

Progetto **Autonomous Laser Manufacturing**

*Progetto di Ricerca & Sviluppo
“Autonomous Laser Manufacturing” finalizzato
all’analisi sui processi per la fabbricazione integrata a
supporto della produzione di dispositivi funzionanti
senza l’intervento umano (cd autonomi) grazie
all’adozione di tecnologie avanzate abilitanti il
paradigma della digital transformation*

Analisi Tecniche

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, i ricercatori hanno lavorato alla visione a lungo termine di poter scaricare un file del dispositivo e farlo fabbricare premendo un pulsante. Oggi, i profani possono già farlo per oggetti passivi, principalmente decorativi, acquisendo un file di progettazione da una piattaforma, come Thingiverse, e quindi utilizzando un laser cutter o una stampante 3D disponibili in commercio per fabbricarlo. Tuttavia, non è ancora possibile per i non addetti ai lavori scaricare e creare dispositivi elettromeccanici funzionali completi di sensori e attuatori. Per realizzare un dispositivo completamente funzionale, un sistema di fabbricazione deve integrare tre capacità: deve essere in grado di fabbricare la geometria del dispositivo, aggiungere tracce di circuito e incorporare componenti elettronici. Tuttavia, i dispositivi di fabbricazione personale non hanno ancora le capacità per integrare tutti e tre i passaggi.

Mentre l'obiettivo a lungo termine nella ricerca sulla fabbricazione è realizzare dispositivi completamente funzionali da zero, ovvero fabbricare non solo la geometria e le tracce del circuito, ma anche i componenti elettronici dalla materia prima durante un processo di fabbricazione integrato, questa è ancora una ricerca lontana visione. Oggi, solo pochi componenti di base, come resistori e LED, hanno dimostrato di essere fabbricabili su macchine per la fabbricazione personale. Pertanto, mentre i ricercatori di HCI sono stati in grado di fabbricare la geometria e le tracce dei circuiti di oggetti funzionali utilizzando macchine di fabbricazione personale, i sensori e gli attuatori che vengono aggiunti manualmente a questi oggetti dopo la fabbricazione sono ancora prodotti

utilizzando la produzione di massa industriale. Ad esempio, mentre Foldtronics e LASEC fabbricano automaticamente la geometria e le tracce del circuito utilizzando rispettivamente un plotter da taglio e un laser cutter, gli utenti finali devono ancora assemblare componenti elettronici disponibili in commercio sul circuito.

In questo progetto, ci basiamo sui sistemi di cui sopra proponendo una macchina di fabbricazione che crea la geometria del dispositivo, aggiunge tracce di circuito e quindi incorpora componenti elettronici in modo automatizzato. Con una macchina del genere, gli utenti devono solo caricare i componenti in una cartuccia all'inizio del processo di fabbricazione ed eseguire il file di fabbricazione per ricevere un dispositivo completamente funzionante. Poiché molti dispositivi possono essere creati da circuiti assemblati da un sottoinsieme di componenti elettronici di base come transistor, resistori e condensatori, il caricamento di un insieme di questi consentirebbe agli utenti di scaricare e stampare una grande varietà di circuiti diversi come ponti ad H e op- amplificatori per costruire dispositivi generici in grado di svolgere compiti più complessi come il pilotaggio del motore, il rendering del display e il condizionamento del segnale. Esistono due possibili percorsi per creare una piattaforma di fabbricazione in grado di fabbricare geometria, tracce di circuiti e assemblare componenti elettronici: potenziare un dispositivo di fabbricazione esistente con un componente aggiuntivo hardware personalizzato o costruire un nuovo dispositivo di fabbricazione da zero. Il vantaggio di potenziare un dispositivo di fabbricazione esistente è che l'infrastruttura esistente può essere sfruttata e quindi lo sforzo ingegneristico richiesto per creare la funzionalità può essere

potenzialmente ridotto. Inoltre, le nuove capacità di fabbricazione possono essere rese disponibili a un'ampia gamma di utenti che già possiedono tali dispositivi e li conoscono. Tuttavia, l'aumento dei dispositivi esistenti comporta le sue sfide poiché il software proprietario che esegue dispositivi di fabbricazione commerciale in genere non consente modifiche, che sono necessarie per istruire un componente aggiuntivo hardware personalizzato per eseguire la sua funzione. Per risolvere questo problema, abbiamo sviluppato una tecnica che consente all'add-on hardware di comunicare con il dispositivo di fabbricazione commerciale senza la necessità di modificare il codice sottostante. L'idea chiave è incorporare segnali nel file di fabbricazione che determinano movimenti specifici della testa di fabbricazione, che possono essere rilevati con un sensore di movimento (accelerometro) attaccato alla testa. Tali segnali possono informare l'add-on hardware su quali parti del file di fabbricazione sta attualmente eseguendo la testa di fabbricazione e quindi istruire l'add-on hardware a svolgere la sua funzione al momento giusto.

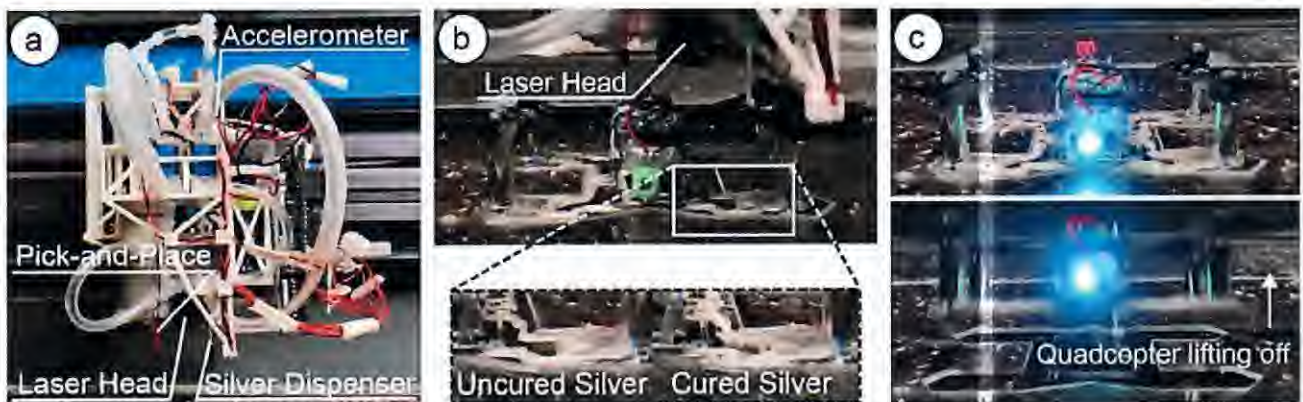
Sebbene la tecnica di segnalazione basata sul movimento per aumentare i dispositivi di fabbricazione esistenti funzioni potenzialmente per diversi tipi di macchine di fabbricazione, purché dispongano di una testa di fabbricazione su una piattaforma di movimento e consentano l'inclusione di linee di movimento personalizzate nel file di fabbricazione, la nostra piattaforma si concentra su un laser cutter commerciale. Abbiamo scelto una taglierina laser come piattaforma di fabbricazione per la sua velocità operativa e quindi per i tempi di consegna rapidi per la prototipazione. Per aumentare il taglio laser con le capacità di creare tracce di circuiti e assemblare componenti elettronici, abbiamo sviluppato

un componente aggiuntivo hardware personalizzato costituito da un erogatore d'argento e un meccanismo pick-and-place montato sulla testa del taglio laser esistente. Quando le linee di movimento incorporate nel file di fabbricazione indicano che è necessario fabbricare una traccia di circuito, l'erogatore d'argento inizia a deporre l'argento mentre il carrello di movimento del laser continua il suo movimento lungo il percorso codificato nel disegno. Allo stesso modo, quando le linee di movimento incorporate nel file di fabbricazione indicano che un componente deve essere prelevato e posizionato, una pompa collegata al meccanismo di prelievo e posizionamento crea una pressione negativa per prelevare il componente.

Poiché l'argento non è ancora conduttivo dopo che è stato erogato, abbiamo sviluppato una tecnica che utilizza il calore del laser per la polimerizzazione termica dell'argento erogato. Questo processo viene utilizzato anche per collegare rigidamente i componenti elettronici alle tracce del circuito, determinando l'assemblaggio finale del dispositivo completamente funzionante. In contrasto con i metodi che si basano su conduttori a base di carbonio e filamenti stampati in 3D, l'erogazione e la polimerizzazione dell'argento creano tracce di circuito altamente conduttive. Inoltre, la fase di saldatura laser elimina anche la necessità di una procedura di polimerizzazione manuale.

Per supportare la progettazione di dispositivi completamente funzionali che possono essere fabbricati sulla nostra macchina di fabbricazione aumentata, forniamo anche un kit di strumenti software che consente agli utenti di progettare dispositivi in un editor 2D creando contemporaneamente sia la loro geometria che il layout elettronico. Uno strumento di visualizzazione personalizzato

fornisce quindi un rendering 3D della geometria risultante e mostra l'ordine delle fasi di fabbricazione, che gli utenti possono utilizzare per convalidare il progetto prima di realizzarlo. All'esportazione, il software traduce quindi il design personalizzato dell'utente in istruzioni della macchina incorporate in un singolo file di fabbricazione (.pdf) che può essere fabbricato utilizzando il software di taglio laser standard per realizzare il dispositivo funzionale in una volta sola.



In sintesi, questo progetto fornisce i seguenti contributi:

- un componente aggiuntivo hardware costituito da un erogatore d'argento e un meccanismo pick-and-place per aumentare la funzionalità di un laser cutter esistente con la possibilità di creare tracce di circuiti e posizionare componenti;
- saldatura laser, una tecnica per la polimerizzazione delle tracce d'argento erogate utilizzando il calore del laser CO2 esistente per creare tracce circuitali altamente conduttive;

- una tecnica di segnalazione basata sul movimento per potenziare una piattaforma di fabbricazione esistente senza la necessità di interfacciarsi con il software sottostante;
- un toolkit software composto da tre elementi: uno strumento che supporta la progettazione simultanea della geometria del dispositivo, delle tracce dei circuiti e dei layout dei componenti elettronici; uno strumento che visualizza la geometria 3D risultante e le fasi del processo di fabbricazione; e una pipeline di traduzione che converte il progetto in istruzioni macchina per il dispositivo di fabbricazione e il componente aggiuntivo hardware.

Nel resto di questo progetto, esamineremo prima il lavoro correlato e poi discutiamo ciascuno dei contributi in ordine. Presentiamo quindi una valutazione tecnica del nostro lavoro e mostriamo una serie di scenari applicativi.

PANORAMA INDUSTRIALE

Il nostro lavoro è correlato alla ricerca che potenzia le macchine di fabbricazione esistenti e alla ricerca che indaga su come realizzare dispositivi elettromeccanici funzionali fabbricando tracce di circuiti e assemblando componenti elettronici.

Fabbricazione di tracce di circuiti per supportare dispositivi elettromeccanici

I ricercatori hanno sviluppato una varietà di metodi alla ricerca della fabbricazione di dispositivi funzionali. Uno dei primi approcci è stato quello di aumentare gli oggetti stampati in 3D passivi con funzionalità di circuito aggiungendo loro tracce di circuito dopo la fabbricazione. Ad esempio, in Un-Toolkit, gli utenti disegnano circuiti utilizzando una penna da disegno 2D caricata con inchiostro argento. Allo stesso modo, in Midas, gli utenti attaccano del nastro conduttivo agli oggetti esistenti per migliorarli con la funzionalità del circuito. PipeDream stampa in 3D oggetti con tubi interni e poi chiede agli utenti di riempire i tubi con vernice di rame dopo la fabbricazione per renderli conduttivi. Estendendo questo lavoro, SurfCuit crea canali sulla superficie di un oggetto stampato in 3D su cui gli utenti applicano nastro di rame e saldano i componenti.

Più di recente, i ricercatori hanno studiato come automatizzare il processo di creazione del circuito. Ad esempio, un foglio laminato (materiale di base e strato di rame conduttivo) può essere utilizzato in un taglio laser per creare tracce di

circuiti sulla superficie del foglio tramite taglio (Foldtronics) o ablazione (LASEC). Un'altra tecnologia, la stampa a getto d'inchiostro di inchiostro argento, può stampare tracce di circuiti direttamente su substrati 2D esistenti (Instant Inkjet Circuits, Building Functional Circuits). Con la disponibilità di filamenti conduttivi per la stampa 3D, i ricercatori hanno anche iniziato a creare insieme la geometria degli oggetti e le tracce dei circuiti in un unico processo integrato. PrintPut, Capricate, Trilaterate e Flexibles utilizzano tutti un filamento conduttivo a base di carbonio insieme al filamento normale per fabbricare sensori tattili capacitivi e fili su geometrie 3D. Il filamento conduttivo a base di carbonio, tuttavia, ha un'elevata resistenza alle tracce e non supporta tutte le forme di elettronica. Approcci più recenti come la stampa 3D con inchiostro argento (Voxel8) e fibra di carbonio (FiberWire) producono connessioni a resistenza inferiore e quindi aumentano la gamma di componenti elettronici e circuiti pratici.

Integrazione automatica di componenti elettronici

Nessuna delle tecniche sopra menzionate integra automaticamente i componenti elettronici come parte del processo di fabbricazione, che è un compito che deve essere completato dopo la fabbricazione. Di solito questo deve essere fatto manualmente, per esempio come descritto da Hodges et al. (adesivi per circuiti). Un approccio di Valentine et al. utilizza un dispenser d'argento per creare tracce di circuito e un meccanismo pick-and-place per assemblare automaticamente i componenti su uno stadio di controllo del movimento commerciale a 3 assi.

Tuttavia, senza aggiungere un meccanismo di polimerizzazione dedicato al loro processo di fabbricazione additivo per scrittura diretta, manca la capacità di polimerizzare le tracce durante la fabbricazione. Pertanto, dopo la fabbricazione, i dispositivi risultanti da Valentine et al. devono essere rimossi manualmente e stagionati separatamente a temperature elevate in un forno per ulteriori due ore per essere resi funzionali. Ciò può causare problemi poiché il lavoro esistente ha dimostrato che quando i componenti elettronici vengono inseriti in un forno per polimerizzare l'argento, la temperatura può danneggiare significativamente le parti (circuiti termoretraibili). Inoltre, sottoporre l'intero substrato del materiale a temperature elevate può causare deformazioni o degradazione di molti polimeri stampati in modo additivo. Per risolvere questo problema, costruiamo il nostro potenziamento hardware su un laser cutter esistente e utilizziamo il calore del laser sia per polimerizzare le tracce realizzate con pasta d'argento che per saldare i componenti in posizione. Per questo, ci basiamo sul lavoro di Lambrichts et al., che ha usato un laser per curare la pasta saldante. La pasta saldante è un materiale diverso, che può essere utilizzato solo per saldare i componenti ma non per creare tracce di circuiti. Dimostrando che la saldatura laser può essere utilizzata anche per polimerizzare la pasta d'argento, forniamo un metodo in grado di creare e polimerizzare rapidamente tracce di circuiti e quindi di realizzare dispositivi perfettamente funzionanti in pochi minuti. Poiché la saldatura laser affronta tracce specifiche in modo selettivo, elimina anche il problema di sottoporre il materiale e i componenti elettronici a sollecitazioni termiche sull'intero foglio.

Piuttosto che aggiungere componenti elettronici esistenti al circuito, diversi ricercatori hanno studiato come fabbricare componenti elettronici da zero. Lewis et al., ad esempio, ha aperto la strada alla stampa 3D di un LED. Una stampante 3D per dispositivi elettromagnetici ha mostrato come è possibile creare motori e solenoidi avvolgendo bobine attorno alla geometria 3D durante il processo di stampa. Tuttavia, poiché la maggior parte dei componenti elettronici non può ancora essere creata con strumenti di fabbricazione personale, gli oggetti fabbricati devono ancora avere componenti elettronici disponibili in commercio, come un microcontrollore, aggiunti al loro circuito dopo la fabbricazione.

Aumento delle macchine di fabbricazione esistenti

Diversi progetti di ricerca hanno potenziato le macchine di fabbricazione esistenti con hardware aggiuntivo per eseguire nuove attività. Una delle prime estensioni delle macchine di fabbricazione è stata quella di potenziare i laser cutter con una telecamera per poter rilevare il materiale sul letto di fabbricazione (LaserCooking, PacCam). Più recentemente, i ricercatori hanno creato componenti aggiuntivi hardware per fabbricare nuovi tipi di geometrie, ad esempio aggiungendo una testa di fresatura a una stampante 3D esistente (ReForm). È anche possibile utilizzare una fresa per annullare le fasi di fabbricazione precedenti, ad esempio fresare via la geometria precedentemente creata (patch di oggetti fisici). I ricercatori hanno anche modificato la piastra di costruzione fissa esistente delle stampanti 3D e l'hanno sostituita con una piattaforma rotante per consentire la stampa 3D su oggetti inclinati (Patching

Physical Objects, Revomaker). Per assemblare parti stampate in 3D in meccanismi più complessi, i ricercatori hanno creato un'estensione della testa di una stampante 3D in grado di prelevare parti dalla piattaforma e posizionare le parti in una nuova posizione (testa di stampa 3D come manipolatore robotico). Infine, i ricercatori hanno aggiunto componenti aggiuntivi hardware personalizzati ai dispositivi di fabbricazione esistenti per studiare come fabbricare componenti elettronici da zero. Una stampante 3D per dispositivi elettromagnetici interattivi, ad esempio, utilizza un meccanismo di erogazione del filo per avvolgere le bobine, creando così un primo set di dispositivi elettromagnetici stampati in 3D.

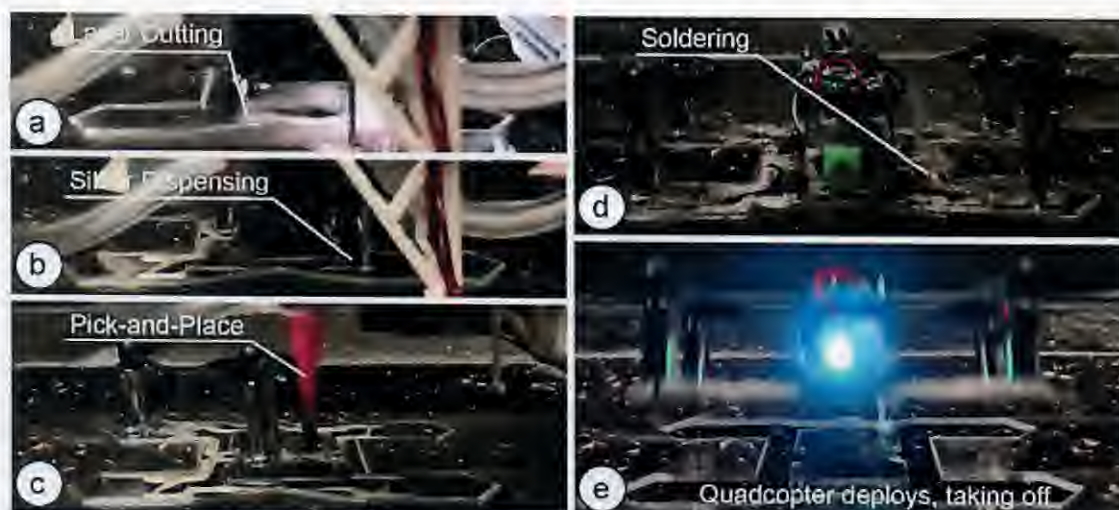
Jubilee evidenzia che la costruzione di macchine di fabbricazione è un ostacolo significativo alla creazione di nuovi processi di fabbricazione che devono affrontare i ricercatori. Sebbene ciò motiva ad aumentare le piattaforme esistenti piuttosto che a costruirle da zero, introduce la sfida di come sincronizzare la funzionalità del componente aggiuntivo con quella della piattaforma esistente; Xprint sottolinea che i vincoli hardware e il firmware non open source rimangono sfide importanti per l'integrazione di nuovi processi di fabbricazione nelle piattaforme commerciali. I componenti aggiuntivi hardware esistenti, come quelli menzionati nella sezione precedente, si sono quindi basati principalmente su hardware open source: una stampante 3D per dispositivi elettromagnetici interattivi, ad esempio, ha modificato i file di controllo del software per accettare il loro G-code per controllare il loro add-on avvolgicavo. Allo stesso modo, Patching Physical Objects ha utilizzato un'implementazione open source del firmware della stampante 3D MakerBot per controllare i tempi della fresatrice

aggiunta, della pompa, della fotocamera e della piattaforma rotante a 5 assi. Tuttavia, fare affidamento esclusivamente su implementazioni open source limita notevolmente il numero di dispositivi di fabbricazione che possono essere aumentati.

Per essere in grado di aumentare i dispositivi di fabbricazione esistenti senza la necessità di modificare il firmware sottostante, abbiamo sviluppato una nuova tecnica di segnalazione basata sul movimento. La nostra tecnica incorpora segnali nel file di fabbricazione che determinano movimenti specifici della testa di fabbricazione, che possono quindi essere rilevati con un sensore di movimento (accelerometro) collegato alla testa di fabbricazione. Tali segnali possono informare l'add-on hardware quando avviare e interrompere il suo funzionamento poiché rappresentano quale parte del file di fabbricazione è attualmente eseguita.

FABBRICAZIONE AUTONOMA ED ASSEMBLAGGIO LASER

Si tratta di un processo di fabbricazione integrato basato su una taglierina laser disponibile in commercio che è stata potenziata con un erogatore d'argento e un meccanismo pick-and-place per supportare la produzione di dispositivi elettronici perfettamente funzionanti senza l'intervento umano. La figura illustra il processo di fabbricazione: dopo che gli utenti hanno scaricato il file di progettazione, caricato nel software standard di taglio laser e avviato il lavoro di taglio laser, il sistema prima ritaglia la geometria del dispositivo utilizzando la normale funzionalità del taglio laser. Successivamente, l'erogatore d'argento deposita l'argento per le tracce del circuito. Successivamente, la testa pick-and-place preleva i componenti della memoria all'interno del laser e li assembla sulle tracce del circuito. Infine, il laser polimerizza le tracce che collegano rigidamente i componenti al circuito. Una volta che ha completato questi passaggi, il dispositivo è completamente funzionante; qui, il quadricottero vola prontamente dalla piattaforma di fabbricazione.

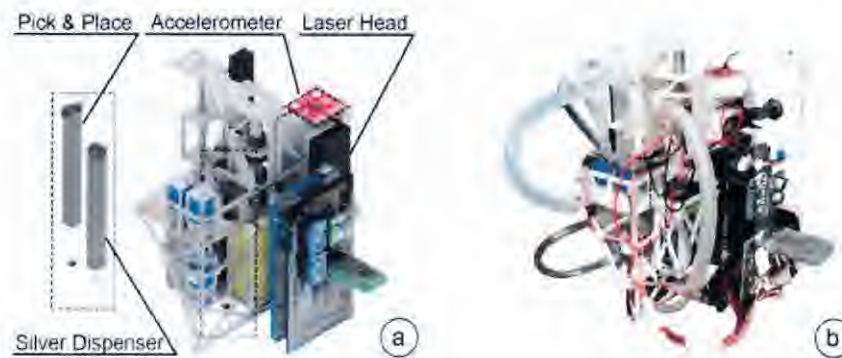


Nelle sezioni seguenti descriviamo in ordine ciascuno dei quattro contributi principali. Iniziamo descrivendo l'add-on hardware che incorpora un dispenser d'argento e un meccanismo pick-and-place. Successivamente spieghiamo la tecnica di saldatura laser. Successivamente, presentiamo la nostra tecnica di segnalazione basata sul movimento e infine illustriamo un flusso di lavoro di progettazione e fabbricazione end-to-end basato sul nostro strumento di progettazione e visualizzazione accoppiato con la pipeline di traduzione che converte il progetto in istruzioni macchina.

HARDWARE ADD-ON: DISTRIBUTORE D'ARGENTO E MECCANISMO DI PICK-AND PLACE

Abbiamo sviluppato un add-on per un laser che gli consente di fabbricare dispositivi elettromeccanici funzionali. Il nostro componente aggiuntivo hardware integra le capacità native del laser cutter di creare la geometria di un dispositivo

con capacità di creazione di circuiti e assemblaggio. Otteniamo questo aggiungendo un erogatore d'argento e un meccanismo pick-and-place alla testa della taglierina laser.



Funzionalità aggiuntiva: creazione di tracce di circuiti e capacità di assemblaggio dei componenti

Il nostro componente aggiuntivo hardware insieme alla funzionalità nativa del laser cutter crea dispositivi funzionali nel modo seguente: (1) per creare la geometria, il nostro sistema utilizza la normale testa del laser cutter per tagliare geometrie 2D e facoltativamente piegarle in 3D utilizzando tecniche, come come LaserOrigami. (2) Per aggiungere tracce di circuito, il nostro erogatore d'argento a forma di siringa estrude pasta d'argento. Può creare tracce di circuiti altamente conduttivi fino a $(3,2 \Omega/m)$ sufficienti per la maggior parte dei componenti elettronici. (3) Per assemblare i componenti, un meccanismo pick and place costituito da una seconda siringa sull'add-on consente di spostare i componenti all'interno del taglio laser. I componenti vengono prelevati da un'area di stoccaggio all'interno della piattaforma di taglio laser. Il nostro componente

aggiuntivo può ospitare componenti di sollevamento fino a una massa di 65 g e piccoli componenti SMD fino alla dimensione 2010. (4) Infine, utilizziamo la saldatura laser (spiegata successivamente) per curare le tracce e renderle conduttive utilizzando il laser esistente. L'alloggiamento del componente aggiuntivo è stato stampato in 3D utilizzando un Ultimaker 3. Con tutte le parti integrate, il componente aggiuntivo pesa 550 g e costa \$ 150 in parti.

Implementazione hardware

- Attuazione pneumatica per l'erogazione di argento e componenti di prelievo/posizionamento: l'estrusione dell'argento dell'add-on e i meccanismi di prelievo e posizionamento sono entrambi azionati pneumaticamente. L'estrusore d'argento è costituito da una siringa da 3 ml con un ago da 18 gauge riempito con pasta d'argento. Il pick-and-place include una seconda siringa da 3 ml collegata a un ago calibro 14 con punta in gomma. Sia per l'erogazione che per il pick-and-place, utilizziamo un'unica pompa pneumatica (TCS Electrical, nominale 6V) che supporta entrambi i meccanismi regolando l'alimentazione dell'aria tramite una rete di tre elettrovalvole identiche a 3 vie e 2 posizioni (Phoncoo, nominale 6V).
- Azionamento verticale per il prelievo e il posizionamento dei componenti dal piano di fabbricazione: la siringa di prelievo e posizionamento deve viaggiare verticalmente durante il suo funzionamento, discendendo al piano di fabbricazione per prelevare/posizionare i componenti e salire durante il viaggio per evitare collisioni con altri componenti. La siringa

pick-and-place è azionata verticalmente da un motore passo-passo NEMA 14 (StepperOnline) tramite madrevite e giunto rigido, a cui è collegata in serie tramite un potenziometro lineare a molla (Sensata 9600). Ciò offre al meccanismo pick-and-place la conformità necessaria per evitare danni, consentendo al tempo stesso al software del controller di valutare le forze di contatto durante la movimentazione dei componenti. Inoltre è fissato rigidamente ad un secondo potenziometro lineare (BOURNS) che permette di rilevarne l'altezza e quindi la distanza dal foglio di materiale in tempo reale.

→ Logica di controllo dell'add-on: per abilitare la logica di controllo per l'add-on, abbiamo montato un microcontrollore (Arduino Mega 2560) sull'add-on e lo abbiamo schermato con un PCB personalizzato che ospita l'elettronica di supporto necessaria per l'add-on -in poi. L'elettronica di supporto include un driver del motore (Adafruit DRV8833), un regolatore buck da 6 V (Pololu D24V25F6), e l'accelerometro (parte di un IMU Sparkfun LSM9DS1). Per commutare la pompa tra la siringa erogatrice d'argento e la siringa pick-and-place, vengono utilizzati tre transistor NPN paralleli (2N2222) per la protezione da sovracorrente, ciascuno dotato di resistori di zavorra in serie da 1,5 per evitare l'instabilità termica.

Valutazione tecnica del componente aggiuntivo hardware

Abbiamo valutato sia la deposizione di argento che le capacità di prelievo e posizionamento per fornire informazioni su quale tipo di circuiti è possibile creare.

Caratteristiche della traccia di deposito d'argento: poiché il calibro dell'ago ha un impatto significativo sulla larghezza minima della traccia, abbiamo eseguito un esperimento per determinare il calibro dell'ago più piccolo attraverso il quale la nostra pompa da 6V potrebbe erogare argento. I manometri ad ago più piccoli richiedono pressioni più elevate per erogare l'argento altamente viscoso. Abbiamo scoperto che testando i calibri degli aghi da 14 a 21, quel 18 era il calibro più alto attraverso il quale la nostra pompa da 6 V era in grado di erogare argento. Abbiamo quindi provato a depositare questo argento in due modi. In primo luogo, depositando direttamente su un substrato di materiale, che facilita la rapida fabbricazione del dispositivo ma consente all'argento di diffondersi sul substrato nel tempo, aumentando le larghezze delle tracce fino a 3 mm. Come seconda alternativa più lenta, abbiamo inciso canali da 0,75 mm utilizzando un laser sfocato e applicato argento in questi, ottenendo una larghezza minima di traccia di 0,75 mm con la nostra configurazione attuale. Per il futuro, questa larghezza di traccia potrebbe essere ulteriormente ridotta utilizzando una pompa più forte e un ugello più stretto; Valentino et al. ad esempio, utilizzare un ugello da 0,2 mm con la loro piattaforma.

Dopo aver determinato la larghezza minima della traccia, abbiamo anche determinato la distanza minima tra due tracce adiacenti, che è importante poiché

determina la spaziatura dei pin e quindi la dimensione dei componenti utilizzabili. Per trovare la distanza minima tra le tracce adiacenti, abbiamo depositato e saldato tracce parallele distanziate tra 0,4 mm e 1,8 mm con incrementi di 0,2 mm. Abbiamo scoperto che la distanza minima era di 0,8 mm tra le tracce per l'argento che era stato adeguatamente refrigerato prima dell'uso, poiché l'elevata viscosità e la tensione superficiale dell'argento ne impediscono la diffusione dopo l'erogazione. Tuttavia, per l'argento lasciato a temperatura ambiente, 1,5 mm era la distanza minima raggiungibile con il calibro dell'ago scelto. Distanze inferiori possono causare cortocircuiti tra le tracce adiacenti a causa della diffusione dell'argento sul substrato o del leggero rigonfiamento durante la polimerizzazione laser. Inoltre, mentre il nostro erogatore d'argento pressurizza negativamente per eliminare la trasudazione prima di spostarsi tra le tracce, non viene azionato sull'asse z e quindi non può ritrarsi dal substrato, causando occasionalmente la diffusione dell'argento tra le tracce. Ciò, tuttavia, non provoca cortocircuiti o impatti sul funzionamento del dispositivo poiché l'argento diventa conduttivo solo laddove indirizzato dal laser che mira solo alle tracce effettive, quindi l'argento rimanente può essere rimosso. Per lavori futuri, abbiamo in programma di rendere il distributore retrattile per evitare un'ulteriore diffusione. Sulla base di questi risultati, concludiamo che attualmente possiamo creare tracce abbastanza fini da funzionare con componenti SMD fino a una distanza tra i pin di 1,55 mm in condizioni ideali dove l'argento è stato refrigerato prima dell'uso e 2,3 mm quando l'argento è a temperatura ambiente, il che può essere utilizzato per componenti con spaziatura pin standard di 2,54 mm.

Criteri di prelievo e posizionamento dei componenti: abbiamo valutato i criteri in base ai quali il sistema può prelevare e posizionare i componenti. Innanzitutto, i componenti richiedono una superficie piana minima di 3x3 mm sopra il centro di massa del componente affinché l'ugello di 2,5 mm di diametro della punta di aspirazione formi un buon contatto. Abbiamo scoperto che questo potrebbe essere aumentato o diminuito aumentando o diminuendo rispettivamente il diametro dell'ugello pick-and-place. In secondo luogo, i componenti devono avere una massa inferiore a 65 g affinché l'aspirazione della pompa li sollevi. Questa soglia consente di sollevare componenti di grandi dimensioni, come un microcontrollore Arduino Mega (37 g). Una pompa più potente potrebbe aumentare ulteriormente questa soglia. In terzo luogo, la loro altezza non può superare i 27 mm, attualmente limitata dalla massima estensione del potenziometro lineare utilizzato per valutare l'altezza di prelievo. Dati questi vincoli, il processo può scegliere componenti grandi e pesanti, come le tipiche batterie da 3V; componenti alti come i rotori; e una varietà di piccoli componenti, come resistori SMD fino alla dimensione 2010. Per lavori futuri, questi vincoli possono essere ulteriormente sollevati utilizzando un ugello più piccolo, una pompa più grande e una vite di comando più lunga.

Utilizzo nel tempo: durante la fabbricazione, l'assorbimento di potenza di picco misurato dalle due batterie parallele agli ioni di litio da 9 V integrate è stato di 13,5 W. Tra i casi a vuoto di taglio/piegatura e i casi a carico variabile di produzione di PCB, questo è sufficiente per circa 4 ore di creazione continua del dispositivo. Non abbiamo rilevato irregolarità nel movimento del carrello laser che indicherebbero uno stress eccessivo sul laser cutter durante l'uso.

SALDATURA LASER: UTILIZZARE UN LASER PER CURARE TRACCE DI CIRCUITO

Quando sia la pasta d'argento è stata depositata sia i componenti sono stati posizionati su un substrato nel taglio laser, l'argento non è ancora conduttivo, né lega rigidamente i componenti al substrato. Per questo, l'argento richiede la polimerizzazione tramite riscaldamento, tradizionalmente ottenuta cuocendo il dispositivo creato in un forno prima che diventi funzionale. Tuttavia, questo presenta diversi inconvenienti, ad esempio il calore nel forno può danneggiare il substrato di materiale e i componenti elettronici a causa delle sollecitazioni termiche. Per risolvere questo problema, abbiamo sviluppato una tecnica che utilizza il laser per curare le tracce del circuito e collegare i componenti elettricamente. Un vantaggio dell'utilizzo del laser è che consente un processo di fabbricazione completamente integrato senza bisogno di lavoro manuale. Inoltre, il calore viene applicato solo localmente alle tracce e quindi interessa il foglio di materiale solo nelle posizioni della traccia. Infine, l'utilizzo del laser è veloce, circa 5 minuti in contrasto con le 2 ore ottenute tramite riscaldamento uniforme in forno. Una volta che l'ultima traccia del circuito è polimerizzata, il dispositivo è funzionante appena fuori dal letto di fabbricazione.

Impostazioni di fabbricazione per la saldatura laser

Abbiamo eseguito una serie di esperimenti per determinare le migliori impostazioni di potenza, velocità e asse z per la polimerizzazione delle tracce

d'argento. Per gli esperimenti, abbiamo utilizzato un laser cutter ULS.PLS.150D di Universal Laser Systems dotato di una lente da 2,0 pollici. Per l'argento, abbiamo utilizzato la pasta d'argento di SunChemical (C2180423D2), che ha una composizione di 56,69% di argento 24K e 43,31% di una miscela di resina e solventi.

Impostazioni di potenza/velocità/altezza: per trovare le impostazioni ammissibili del taglio laser che hanno polimerizzato con successo l'argento, abbiamo dispensato una serie di tracce d'argento da 100 mm, quindi le abbiamo saldate con parametri diversi. Per prima cosa abbiamo calibrato l'offset verticale che ha prodotto un diametro del punto laser sfocato uguale alla larghezza della traccia dell'argento. Abbiamo quindi irradiato l'argento utilizzando permutazioni delle impostazioni di potenza e velocità sull'intervallo dallo 0,2% al 90%, registrando la resistenza delle tracce utilizzando un multimetro Greenlee DM-820A e registrando se era viscoso (non polimerizzato), solido (polimerizzato) o bruciato (sovrastampato) al tatto. Abbiamo trovato numerose combinazioni di potenza-velocità ammissibili che producono tracce rigide e conduttive. Questi sono delimitati da 0,2% di velocità e 7% di potenza sul limite inferiore e 7% di velocità e 90% di potenza sul limite superiore, con interpolazione lineare che produce impostazioni ammissibili nel mezzo, mostrando potenze inferiori che richiedono velocità commisuratamente inferiori per curare efficacemente l'argento. Rapporti potenza/velocità superiori a questo producono tracce carbonizzate e fragili, mentre rapporti potenza/velocità inferiori lasciano l'argento scarsamente conduttivo e non polimerizzato. Inoltre, velocità elevate superiori al 7% producono tracce che rimangono non polimerizzate per via sottocutanea

indipendentemente dalla potenza, mentre le potenze inferiori all'1% non elevano affatto le temperature a sufficienza per polimerizzare le tracce.

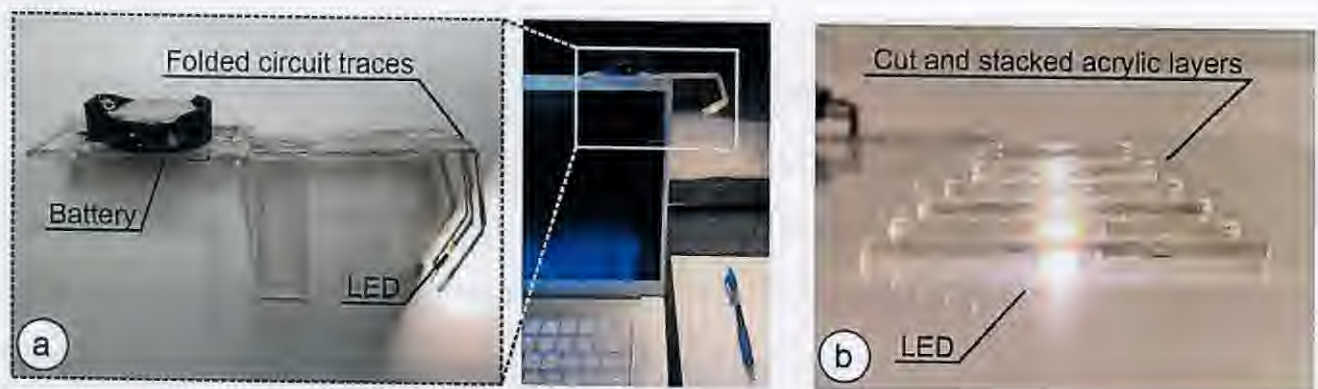
Creazione di geometrie non planari

In questa sezione, riportiamo due prove di concetto che mostrano diversi metodi per creare geometrie non planari.

Tracce di circuiti piegati 2.5D con saldatura laser: poiché la nostra tecnica è basata su un laser cutter, che ha dimostrato di essere in grado non solo di creare geometrie 2D ma anche geometrie 3D tramite piegatura, abbiamo anche studiato se può dispensare e curare le tracce del circuito che sono posizionate su una piega, il che consentirebbe di fabbricare geometrie 2.5D con tracce ed elettronica incorporate. I nostri primi esperimenti hanno mostrato che utilizzando il laser per riscaldare lentamente le tracce attraverso una cerniera, l'argento rimane viscoso e non polimerizzato, il che consente al substrato di diventare cedevole e piegarsi sotto la propria gravità. Continuando il processo di riscaldamento dopo la piegatura, l'argento polimerizza e si indurisce gradualmente, producendo geometrie 2.5D con tracce incorporate. Sebbene non abbiamo valutato le diverse impostazioni di potenza/velocità in un esperimento controllato, non abbiamo osservato una differenza di resistenza tra le tracce piegate e planari.

Taglio e impilamento di strutture 3D a strati: oltre a piegare tracce 2.5D, riportiamo un secondo metodo per creare geometrie 3D che sfrutta la combinazione unica del nostro meccanismo pick-and-place con un laser cutter.

Oltre a posizionare componenti elettrici su un dispositivo, possiamo anche raccogliere il substrato materiale stesso: tagliando e posizionando ritagli del substrato materiale, questi ritagli possono essere impilati per creare strutture. Discretizzando una struttura in strati, questi strati possono essere tagliati utilizzando un laser focalizzato, impilati tramite pick-and-place e saldati utilizzando un laser sfocato per produrre strutture 3D rigide senza intervento manuale.



Valutazione tecnica della tecnica di saldatura laser

Per determinare la conduttività delle tracce polimerizzate tramite saldatura laser e la qualità della connessione di saldatura tra tracce e componenti, abbiamo eseguito la seguente valutazione tecnica.

Conducibilità: per valutare la conduttività raggiunta dalla saldatura laser in un singolo passaggio del laser, abbiamo fabbricato 8 tracce di lunghezza 0,5 m e con una larghezza minima di 0,8 mm. Abbiamo quindi misurato la resistenza tra le estremità delle tracce utilizzando un multimetro (Greenlee DM-820A). La

resistenza è stata normalmente distribuita intorno a 3,2 Ω /m con una deviazione standard di 0,0005. Il sistema supporta quindi una gamma di componenti elettronici, attuatori, comunicazione I2C, PWM e applicazioni di potenza medio-alta.

Potenza e frequenza: abbiamo utilizzato un alimentatore a corrente limitata per far passare la corrente CC attraverso cinque tracce da 100 mm a 1A, 2A e 3A di potenza senza osservare archi o surriscaldamento. Inoltre, abbiamo utilizzato un generatore di frequenza per fornire un segnale CA da 0 Hz a 100 kHz con incrementi logaritmici. L'analisi del segnale con un oscilloscopio ha mostrato che non vi era alcuna significativa attenuazione del segnale.

Qualità della connessione di saldatura di tracce e componenti: per testare quanto siano forti le connessioni polimerizzate tra le tracce e i componenti, abbiamo valutato la loro rigidità meccanica. Abbiamo utilizzato un componente a due cuscinetti e appesi dei pesi alla superficie del componente per applicare forze normali comprese tra 25 g e 300 g con incrementi di 25 g. Abbiamo scoperto che era necessaria una forza normale di 225 g per scollegare il componente dalla traccia. La forza della connessione di polimerizzazione è notevolmente inferiore a quella di una connessione di saldatura tradizionale. Sebbene questo possa essere uno svantaggio per i dispositivi sottoposti a sollecitazioni meccaniche elevate, ha anche il vantaggio che i componenti possono essere riutilizzati, poiché gli utenti possono rimuoverli con una forza ragionevole.

Deformazione: la deformazione è una forma di distorsione del materiale che può verificarsi durante il taglio laser e può derivare anche dalla saldatura laser. Ciò si

verifica a causa di rapidi cambiamenti di temperatura locali dovuti al riscaldamento selettivo delle aree prese di mira. La quantità di deformazione è influenzata sia dalla scelta del materiale che dalle dimensioni della parte, poiché il calore non può dissiparsi dalle parti più piccole tramite conduzione.

Per esplorare questo, abbiamo testato tre diversi materiali: acrilico estruso, acrilico colato e plexiglass. Tutti erano di uguale trasparenza e spessore (1,5 mm). Sebbene non abbiamo osservato deformazioni per l'acrilico colato e il plexiglass, abbiamo scoperto che l'acrilico estruso mostrava deformazioni e abbiamo calibrato le nostre impostazioni di taglio laser per minimizzarne gli effetti. Poiché alcuni dei nostri dispositivi sono realizzati in acrilico estruso, questa deformazione può essere osservata come risultato del processo di saldatura laser nel video allegato. Sebbene questa distorsione possa avere un impatto sia sull'aspetto visivo dei dispositivi che sul loro funzionamento se si basa su superfici planari precise, gli effetti possono essere ampiamente evitati utilizzando uno dei materiali alternativi. Inoltre, abbiamo scoperto che la deformazione può essere ulteriormente ridotta tagliando il dispositivo nella fase finale del processo di fabbricazione anziché all'inizio, consentendo al materiale circostante di tenerlo in posizione durante la saldatura. In alternativa, le linguette dei connettori possono essere lasciate sul contorno tagliato per ottenere lo stesso effetto, ovvero mantenere il dispositivo attaccato al foglio durante la saldatura, e tagliando queste linguette per rilasciare il dispositivo alla fine.

Pertanto, concludiamo che la saldatura laser con un laser a CO₂ è adatta per creare tracce altamente conduttive, che la connessione di saldatura mantiene i componenti in posizione consentendo la rimozione dei componenti utilizzando la

forza manuale e che la deformazione dovuta al calore del laser è solo un problema per particolari tipologie di materiali.

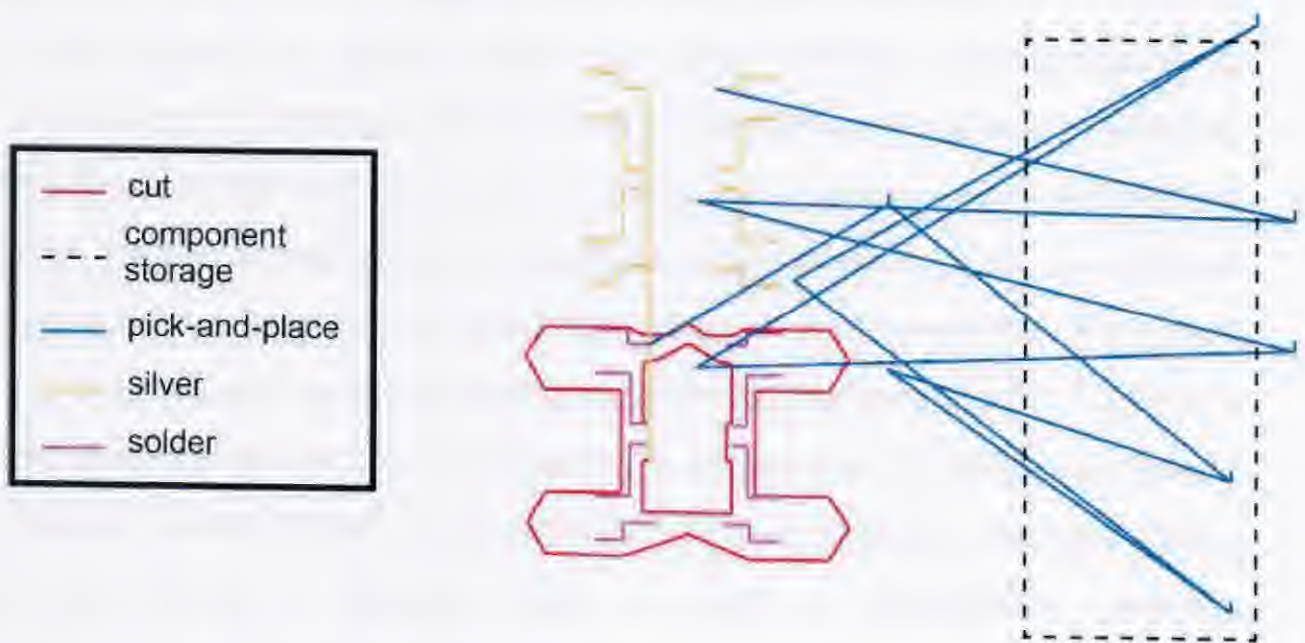
AUMENTARE UN CUTTER LASER ESISTENTE ATTRAVERSO LA SEGNALAZIONE BASATA SUL MOVIMENTO

L'aumento dei dispositivi di fabbricazione esistenti riduce lo sforzo di progettazione sfruttando le piattaforme esistenti anziché creare hardware/software da zero e rendendo la nuova funzionalità disponibile a un'ampia gamma di utenti che già possiedono o gestiscono la piattaforma. Tuttavia, l'interfaccia con una piattaforma di fabbricazione commerciale che non è costruita per ospitare un'espansione della sua funzionalità è impegnativa. Nel costruire il nostro potenziamento hardware su una testa laser, abbiamo studiato soluzioni che non richiedono l'accesso al software proprietario della piattaforma di fabbricazione e che quindi potrebbero essere potenzialmente indipendenti dalla piattaforma per consentire l'aumento di una gamma di diversi dispositivi di fabbricazione. A tal fine, il nostro metodo prevede due fasi principali. Innanzitutto, il nostro metodo incorpora righe aggiuntive nel file di fabbricazione. Questi includono percorsi aggiuntivi come le traiettorie per la navigazione tra i componenti elettrici e anche modelli di movimento specifici che segnalano istruzioni al componente aggiuntivo. In secondo luogo, il nostro metodo rileva questi modelli di movimento utilizzando un classificatore basato sul movimento basato sui dati dell'accelerometro in esecuzione localmente sul componente aggiuntivo. Il nostro metodo per trasmettere le istruzioni di fabbricazione si basa

quindi solo sulla capacità della piattaforma di fabbricazione di eseguire il movimento nel piano XY; l'add-on non ha una conoscenza esplicita del contenuto del file di fabbricazione stesso.

Creazione del movimento del carrello utilizzando linee aggiuntive nel file di disegno

Per generare il movimento del carrello senza accedere al firmware del laser cutter, aggiungiamo linee extra nel file di disegno che viene inviato al laser. La figura illustra ciò utilizzando un file di progettazione quadrirotore con linee aggiuntive incorporate per l'erogazione dell'argento, il prelievo e il posizionamento e la saldatura. Le linee sono sfalsate nel file di disegno per compensare la posizione dell'add-on rispetto alla testa del laser.



Segnalazione delle transizioni tra le fasi di fabbricazione utilizzando i modelli di movimento nel file di disegno

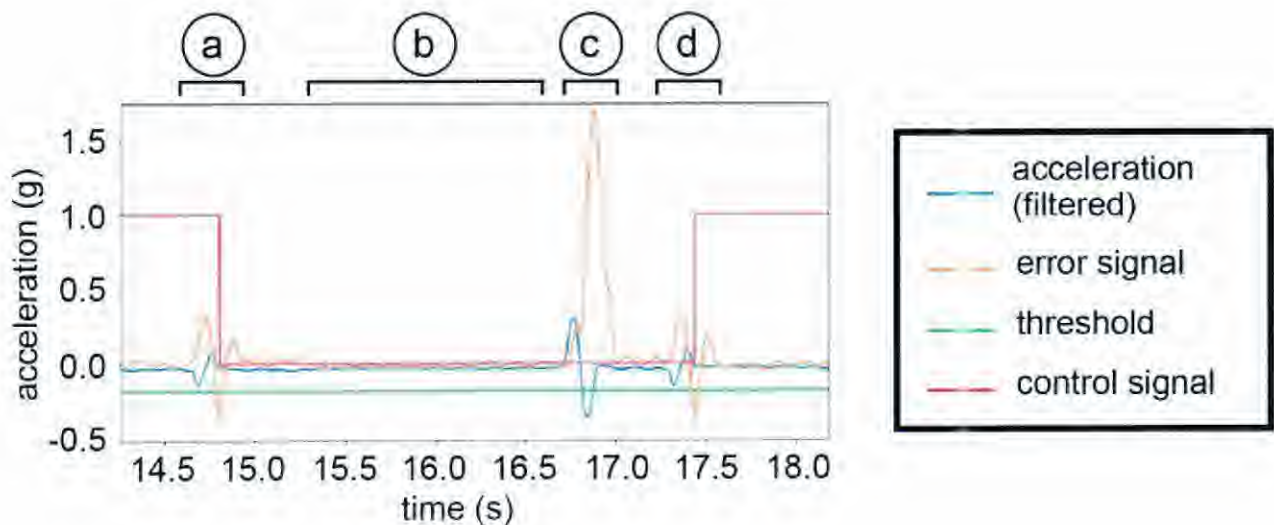
Dopo che sono state incorporate linee aggiuntive per creare traiettorie per la testa laser durante l'erogazione dell'argento e le manovre di prelievo e posizionamento, un passaggio separato prevede la trasmissione delle istruzioni di fabbricazione all'add-on senza comunicazione con il laser cutter. Ciò comporta prima l'inclusione di linee aggiuntive che codificano queste istruzioni di fabbricazione e quindi l'interpretazione di queste utilizzando sensori. Nella scelta dei sensori, abbiamo squalificato i candidati che non potevano essere completamente integrati nell'add-on, come il monitoraggio della posizione esterna. Abbiamo anche squalificato i candidati che potrebbero introdurre dipendenze specifiche della piattaforma, come telecamere di bordo o sensori di posizione che misurano il volume interno della piattaforma di fabbricazione.

Un accelerometro apposto sulla testa laser, invece, ne misura solo il moto inerziale in termini di accelerazione, il che rende possibile la ricreazione su altre piattaforme. Aggiungendo un modello di linea univoco all'inizio e alla fine dei percorsi nel file di fabbricazione, elicitiamo un movimento specifico dalla testa laser, che l'accelerometro di bordo interpreta per avviare o interrompere una procedura di fabbricazione (deposizione d'argento o pick-and-place).

Forma del modello di movimento: per selezionare un modello di movimento per il nostro segnale, abbiamo studiato il movimento di diverse forme. In particolare, abbiamo considerato il moto di rette, quadrati e cerchi per testare rispettivamente i moti indipendenti, sequenziali e simultanei nel piano X-Y.

Sebbene tutti i candidati abbiano prodotto un segnale classificabile in modo univoco, abbiamo scoperto che quadrati e cerchi non erano adatti poiché eseguire i loro movimenti può causare l'estrusione di argento al di fuori di una traccia o collisione con altri componenti. Una linea unidimensionale che segue programmaticamente all'indietro lungo una traccia precedentemente depositata, al contrario, fornisce una traiettoria che mantiene la punta e l'eventuale argento erogato al di sopra delle tracce.

Durata del modello di linea: la durata del modello di movimento, e quindi la lunghezza fisica, deve essere sufficientemente piccola da essere valutata rapidamente dal classificatore per consentire la trasmissione rapida di istruzioni di fabbricazione, ma sufficientemente lunga da consentire al campionamento digitale di produrre un numero sufficiente di punti dati per il classificatore. Abbiamo testato l'esecuzione di linee rette di lunghezze comprese tra 0,5 mm e 6 mm con incrementi di 0,5 mm, misurando la durata di ciascuna. Per la velocità di campionamento massima del nostro processore di 300 Hz, le linee da 3 mm costituivano il segnale più veloce (150 ms) con un numero sufficiente di punti dati (45 campioni) per codificare un segnale identificabile in modo univoco. Accelerando lungo la traccia per 3 mm, quindi decelerando fino all'arresto, il segnale suscita due picchi consecutivi uguali ma opposti sull'accelerometro. Questo crea un segnale unico, poiché nessun'altra manovra richiede di ripercorrere lo stesso identico percorso, che può essere classificato in modo affidabile utilizzando l'accelerometro.



Calibrazione del segnale una tantum e classificazione in tempo reale

Per costruire il classificatore, eseguiamo una calibrazione una tantum del segnale di linea da 3 mm sopra descritto. Eseguiamo questa calibrazione eseguendo il pattern e misurando le corrispondenti accelerazioni lineari dall'accelerometro nel piano X-Y. Campioniamo il pattern a 300 Hz e lo filtriamo low-pass utilizzando un filtro di media a 24 punti per rimuovere il rumore per costruire il modello del segnale.

Per scegliere la soglia del segnale di errore per identificare un segnale, abbiamo costruito un set di dati di veri positivi campionando il modello del segnale 100 volte, registrando per ciascuno l'errore negativo massimo prodotto dal filtro abbinato. In modo equivalente, abbiamo costruito un dataset di veri negativi, compilando ulteriori 100 misurazioni effettuate durante manovre non associate a un segnale. Modellando ciascuno come una distribuzione normale $N(\mu, \sigma^2)$,

abbiamo trovato che la media e la deviazione standard per i veri positivi (X) e i veri negativi (Z) erano $X \sim N(-0.311, 0.002)$ e $Z \sim N(0.057, 0.008)$ rispettivamente e scegliamo la nostra soglia all'intersezione di queste curve (-0,18) in modo da minimizzare le mancate accensioni (falsi positivi e negativi).

Dopo la calibrazione una tantum, il nostro componente aggiuntivo è pronto per il rilevamento in tempo reale dei segnali di movimento incorporati nel file di progettazione. Per il rilevamento in tempo reale, filtriamo i dati di accelerazione grezzi con un filtro passa basso utilizzando un filtro di media a 24 punti e li salviamo in un buffer circolare a 45 punti. Quindi costruiamo un filtro abbinato valutando questo buffer rispetto al modello di segnale utilizzando la norma L2 a 300 Hz. Questo produce un segnale di errore dei dati filtrati passa-basso che il nostro algoritmo di rilevamento normalizza intorno a 0. Quindi valutiamo continuamente l'uscita del filtro abbinato e segnaliamo un'istruzione all'estrusore d'argento o al meccanismo pick-and-place quando il segnale di errore supera una soglia caratterizzata.

Valutazione tecnica del classificatore basato sul movimento

Valutiamo sia quanto sia affidabile il nostro classificatore basato sul movimento in grado di rilevare i segnali di movimento e se l'approccio di classificazione basato sul movimento si trasferisce su diverse macchine di fabbricazione.

Prestazioni: in primo luogo, abbiamo valutato l'accuratezza con cui il nostro classificatore basato sul movimento rileva i segnali incorporati nel file di fabbricazione. Per determinare ciò, abbiamo montato l'add-on sulla testa laser,

quindi abbiamo iniziato la fabbricazione di un design composto da 5 linee orizzontali e 5 linee verticali, ciascuna di 50 mm di lunghezza, per un totale di 10 segnali di avvio e 10 segnali di arresto (20 segnali in totale). Per ogni segnale è stato rilevato un rilevamento riuscito e, dopo che tutte le linee sono state eseguite, l'add-on è stato smontato. Questa procedura è stata ripetuta 10 volte, per un totale di 200 segnali. Un segnale non è stato rilevato, ottenendo un'accuratezza di classificazione del 99,5% per questo test, con 0 falsi positivi e 1 falso negativo. Abbiamo quindi eseguito la fabbricazione del quadricottero, del braccialetto e del PCB cinque volte ciascuno. Questi consistono in un totale di 465 segnali, incluse 305 sequenze di deposizione di argento tra 7 mm e 90 mm di lunghezza e 115 sequenze pick-and-place tra 140 e 190 mm di lunghezza. Durante queste prove non sono state registrate mancate accensioni del segnale. Integrando le funzioni di distribuzione cumulativa delle nostre distribuzioni normali per valutare la curva della caratteristica operativa del ricevitore (ROC) per la nostra soglia di classificazione caratterizzata, troviamo che il nostro modello prevede un tasso di falsi positivi di circa lo 0,2% e un tasso di falsi negativi dello 0,1%, che concorda con questi risultati. Questo risultato mostra che la nostra procedura produce una classificazione affidabile grazie alla nostra capacità di progettare liberamente un segnale unico per il rilevamento. Tuttavia, nel caso in cui il rilevamento si interrompa, il sistema attualmente non ha modo di rilevarlo e prevede di esplorare tale rilevamento come parte del lavoro futuro incorporando linee aggiuntive che funzionerebbero come interruzioni.

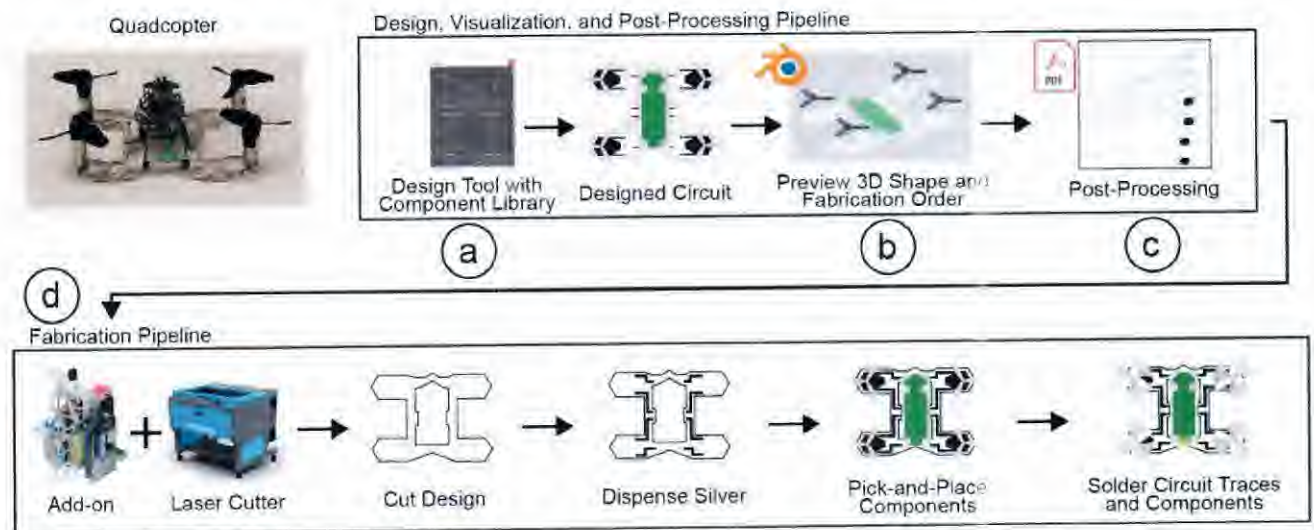
Trasferibilità: abbiamo progettato il componente aggiuntivo hardware per essere completamente autonomo e la segnalazione di fabbricazione basata sul

movimento per dimostrare un design aggiuntivo che può essere utilizzato per aumentare diverse macchine di fabbricazione. Per verificare se il nostro componente aggiuntivo può effettivamente funzionare su diverse macchine di fabbricazione, abbiamo testato il nostro approccio sulla stampante 3D Ultimaker 3. Per condurre questo test, abbiamo scritto uno script G-code personalizzato che imita la deposizione d'argento eseguendo prima un verticale poi un linea orizzontale da 30 mm, con il nostro modello di segnale da 3 mm aggiunto a ogni estremità della linea. Utilizziamo il comando G0 per eseguire il modello, che rappresenta un movimento coordinato a velocità rapida senza estrusione di materiale con velocità di avanzamento impostata su F15000. Abbiamo distribuito questo file 10 volte su Ultimaker 3 e abbiamo ottenuto una precisione di classificazione del segnale del 100%. Sebbene siano necessari ulteriori test su altri dispositivi di fabbricazione prima di poter rivendicare la piena trasferibilità, i risultati mostrano che la segnalazione basata sul movimento ha il potenziale per funzionare su diversi dispositivi di fabbricazione. Prima che la segnalazione basata sul movimento possa essere utilizzata su una nuova macchina, il segnale di movimento deve prima essere caratterizzato tramite la calibrazione una tantum e le clip fisiche del componente aggiuntivo devono essere adattate alla testa dell'utensile di forma diversa.

PROGETTARE UN DISPOSITIVO DA UTILIZZARE

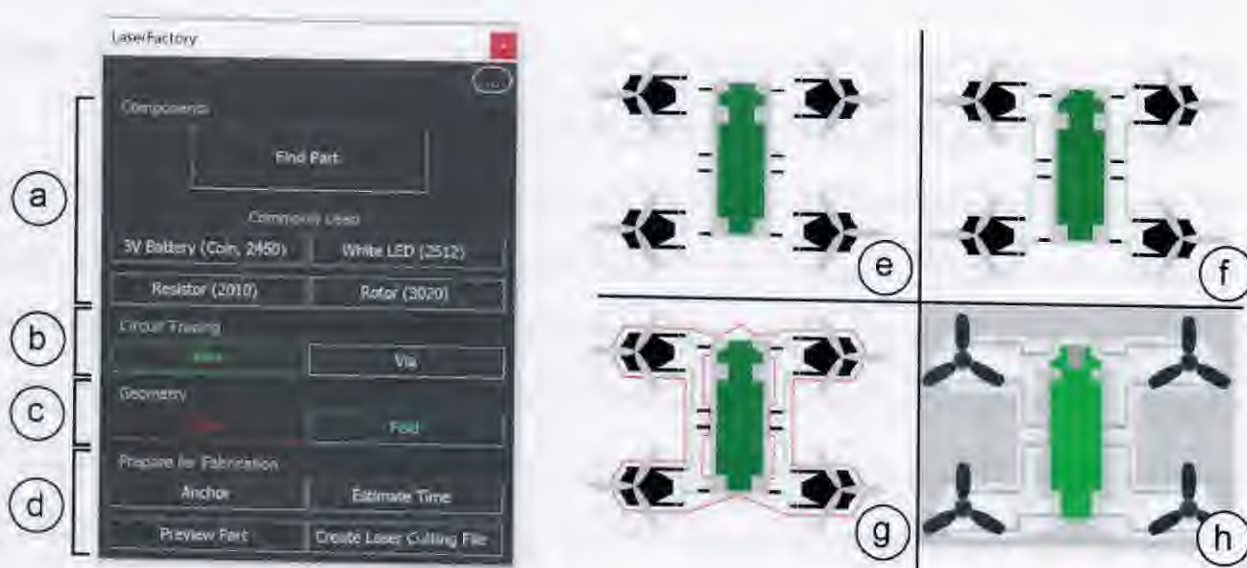
Per supportare la creazione di dispositivi, forniamo la pipeline di fabbricazione end-to-end mostrata nella figura. Consiste in uno strumento di progettazione e

visualizzazione e uno script di post-elaborazione che converte il file di progettazione in un insieme di macchine istruzioni per la fabbricazione del dispositivo sulla taglierina laser aumentata. Lo strumento di progettazione consente agli utenti di creare progetti 2D utilizzando strumenti di disegno per la geometria ("taglia", "piega"), le tracce del circuito ("cavo") e per il posizionamento dei componenti elettronici ("posiziona parte"). Ciò consente agli utenti di progettare contemporaneamente la geometria e il circuito elettronico. Lo strumento di visualizzazione di accompagnamento rende sia il design 2D o 3D finale e consente agli utenti di animare ogni fase del processo di fabbricazione. Questo aiuta gli utenti che potrebbero avere difficoltà a visualizzare il disegno 2D astratto. Inoltre, consente agli utenti di controllare l'ordine di ogni fase del processo di fabbricazione. All'esportazione, il nostro script di post-elaborazione traduce automaticamente il file di progettazione in istruzioni della macchina. Gli utenti non devono aggiungere istruzioni esplicite per il componente aggiuntivo.



Strumento di progettazione

Il nostro strumento di progettazione aiuta gli utenti a posizionare componenti, disegnare tracce di circuiti e progettare la geometria dei loro dispositivi. La figura mostra la barra degli strumenti del nostro strumento di progettazione, che ha le seguenti funzionalità.



Libreria di componenti elettronici: per facilitare la progettazione di circuiti, gli utenti possono selezionare componenti elettronici da una libreria di parti. È possibile accedere ai componenti comuni direttamente dalla barra degli strumenti e altri possono essere trovati utilizzando il pulsante "trova parte" che apre la libreria dei componenti. Dopo aver selezionato un componente, viene caricato come rappresentazione 2D sulla tela. I componenti appaiono come la loro impronta fisica sovrapposta al loro simbolo elettronico. Vedere i componenti

elettronici consente agli utenti di valutare le dimensioni della geometria principale nel loro progetto e di adattare il progetto secondo necessità.

Strumento di trafilatura: il sistema offre uno strumento di trafilatura, che viene utilizzato per collegare componenti elettronici con tracce. Lo strumento filo si aggancia a 0° o 90° man mano che le tracce vengono tracciate seguendo una buona pratica di layout del PCB e può anche agganciarsi agli elettrodi dei componenti quando si avvicinano ad essi, garantendo buoni collegamenti elettrici durante la fabbricazione. Nel disegno, le tracce del circuito sono differenziate da altri tipi di linee codificandole in verde.

Strumenti di disegno della geometria: l'interfaccia utente offre due strumenti di disegno per definire la geometria dell'oggetto: lo strumento di disegno tagliato e lo strumento di disegno piega. Nel disegno, le linee di taglio sono visualizzate in rosso e le linee di piega sono visualizzate in ciano. Per la piegatura, gli utenti devono solo indicare dove piegare, ma non in quale ordine, che è gestito dal nostro script di post-elaborazione. Per la piegatura, gli utenti devono utilizzare lo strumento "ancora" per assegnare una sezione come piano di ancoraggio che vincola questa sezione come quella che rimane planare in caso di piegatura.

Strumenti di esportazione: infine, l'interfaccia include una serie di strumenti da utilizzare al termine del progetto. Lo strumento "stima del tempo" analizza il file per stimare il tempo di fabbricazione totale che viene quindi visualizzato nella vista. Lo strumento "anteprima parte" apre lo strumento di visualizzazione, che descriviamo in maggior dettaglio nella sezione successiva. Infine, lo strumento "crea file di taglio laser" post-elabora il progetto per la fabbricazione e genera il file di fabbricazione finale.

Strumento di visualizzazione

Poiché il disegno 2D è una rappresentazione astratta del progetto risultante, abbiamo sviluppato uno strumento di visualizzazione 3D che gli utenti possono avviare in qualsiasi momento durante il processo di progettazione. La figura mostra lo strumento di visualizzazione, che ha le seguenti funzionalità.



Rendering del progetto 3D: lo strumento di visualizzazione mostra il progetto come una geometria 3D solida, comprese le parti piegate. Ciò consente all'utente di vedere se le pieghe sono posizionate correttamente e si traducono nella geometria 3D desiderata. Inoltre, tutte le impronte dei componenti elettronici vengono sostituite con i rispettivi modelli 3D, fornendo un'anteprima del dispositivo finale.

Ordine delle fasi di fabbricazione: oltre a mostrare il design come forma 3D, lo strumento di visualizzazione contiene anche una riproduzione video che anima ogni fase del processo di fabbricazione. Ciò consente agli utenti di ricontrollare se il file di progettazione post-elaborato contiene l'ordine di fabbricazione corretto. Ad esempio, la geometria piegata deve essere rilasciata con un taglio prima che possa verificarsi qualsiasi piegatura, che può essere osservata nell'animazione.

Visualizzazione del movimento della testa dello strumento: infine, lo strumento di visualizzazione rende anche lo strumento utilizzato in ogni fase di fabbricazione: il laser durante il taglio e la polimerizzazione (e qualsiasi piegatura), il dispenser d'argento durante la creazione della traccia e l'ugello pick-and-place durante il posizionamento dei componenti. Ciò consente agli utenti di valutare potenziali collisioni nella loro progettazione, come intersezioni indesiderate tra il raggio laser e i componenti posizionati per prevenire danni.

Post-elaborazione del file di disegno

Quando si esporta il file di disegno, vengono applicati una serie di passaggi di post-elaborazione al file di disegno per farlo funzionare con il componente aggiuntivo. Il progetto esportato dell'utente contiene solo le linee di taglio e piega, le tracce del circuito e le posizioni dei componenti sul dispositivo. In una prima fase di post-elaborazione, vengono aggiunte ulteriori linee di movimento per il prelievo e il posizionamento dei componenti e l'indurimento delle tracce. Successivamente, tutte le linee che appartengono al distributore d'argento e alla testina pick-and-place sono sfalsate dalla distanza di ciascun componente aggiuntivo dalla testa laser. Inoltre, tutte le linee di polimerizzazione sono sfalsate di una piccola quantità per tenere conto dell'offset dei raggi laser ad altezze maggiori. Successivamente, al disegno vengono aggiunti lo schema di movimento pre-progettato che codifica il segnale di avvio/arresto per il distributore d'argento e il meccanismo di prelievo e posizionamento. Infine, tutte

le linee sono codificate a colori per garantire il corretto ordine di fabbricazione. Tutte le manipolazioni di linea sono riassunte nella tabella seguente.

Fabrication Process			Line Manipulation		Laser Cutter Settings				Laserfactory Hardware Settings				
Step	Primitive	Mandatory?	Offset (X-Y mm)	Pasces	Color	Power (%)	Speed (%)	Height (mm)	Pump	Stepper	Valve 1	Valve 2	Valve 3
#1a	Cut outline	Yes	(0,0)	1	Red	80	30	5	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
#1b	Raster footprints	No	(0,0)	1	Black	30	30	5	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
#1c	Engrave channels	No	(0,4,0,7)	7	Green	70	25	22	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
#2a	Dispense silver	Yes	(-1,8,-68)	1	Yellow	0	1,5	0,8	ON	OFF	OFF	ON	ON
#2b	Signal/De-noise	Yes	(-1,8,-68)	1	Yellow	0	1,5	0,8	ON	OFF	ON	ON	OFF
#3a	Pick	Yes	(1,5,3)	1	Blue	0	1,5	-	ON	-	OFF	OFF	ON
#3b	Carry component	Yes	(1,5,3)	1	Blue	0	1,5	-	ON	OFF	OFF	OFF	ON
#3c	Place	Yes	(1,5,3)	1	Blue	0	1,5	-	ON	-	ON	OFF	ON
#4	Carry silver	Yes	(1,5,3)	1	Magenta	7	1	68	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
#5a	Fold lunge	No	(0,0)	60	Cyan	30	100	68	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
#5b	Cut 2nd outline	No	(0,0)	1	Orange	30	100	5	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

Aggiunta di linee per la saldatura e traiettorie pick-and-place: il file di progettazione originale non contiene linee per prelevare componenti dall'archivio componenti sulla periferia del laser cutter e posizionarli sulla geometria del dispositivo. Generiamo quindi linee aggiuntive per guidare la testa laser tra le posizioni di prelievo di ciascun componente e le posizioni di destinazione sul dispositivo come specificato nel file di progettazione. Per generare le linee, utilizziamo una semplice procedura di pianificazione del percorso che consente di evitare gli ostacoli di tutti gli altri componenti sulla tela. Mentre l'utente disegna solo una volta le tracce del circuito, il percorso di ciascuna traccia del circuito deve essere tracciato due volte: una volta per l'erogazione dell'argento con l'erogatore d'argento e una volta per la polimerizzazione con il laser sfocato. Creiamo così una seconda copia delle tracce circuitali da utilizzare per la polimerizzazione. Infine, aggiungiamo gli schemi di movimento per segnalare all'erogatore d'argento e al meccanismo pick-and-place quando avviare/arrestare il loro funzionamento.

Linee di offset nel piano X-Y: come parte della post-elaborazione, applichiamo offset nel piano X-Y ai diversi passaggi di fabbricazione. Innanzitutto le tracce del circuito e i percorsi di prelievo e posizionamento vengono sfalsati per tenere conto dell'offset fisico tra la testa laser e l'ugello erogatore d'argento e l'ugello prelievo e posizionamento, rispettivamente. Successivamente, applichiamo un secondo giro di offset per la polimerizzazione e la piegatura che coinvolgono il laser sfocato a diverse altezze. Questo viene fatto per tenere conto di un leggero disallineamento tra il nostro laser e l'asse z e richiede una calibrazione una tantum.

Ordine di esecuzione: la maggior parte dei laser cutter ordina l'esecuzione delle linee in base al colore e consente di assegnare ciascun colore a una diversa impostazione di potenza/velocità/asse z. Per imporre il corretto ordinamento dei passaggi nella nostra pipeline di fabbricazione, assegniamo a ogni passaggio un colore designato. Poiché le linee dello stesso colore vengono eseguite per impostazione predefinita nell'ordine in cui sono disegnate e scritte nel file di disegno (.svg), riordiniamo le linee dello stesso colore, ad esempio, per codificare quali linee di piega devono essere eseguite per prime in caso di pieghe seriali. Il nostro sistema post-elabora automaticamente il file di progettazione con le modifiche sopra descritte, producendo un file di fabbricazione pronto per il taglio laser.

Caricamento sulla taglierina laser: dopo la post-elaborazione, gli utenti possono caricare il file di output nel normale software della taglierina laser per iniziare la fabbricazione. Prima di iniziare la fabbricazione, l'utente deve anche caricare i file di impostazione laser corrispondenti (.las) che assegnano le impostazioni di

potenza, velocità e asse z per ciascun colore nel disegno. Le impostazioni per la pompa e altro hardware che supportano il funzionamento del componente aggiuntivo vengono programmate una volta sul suo microcontrollore e quindi valide indipendentemente dal file di progettazione. Tutte le impostazioni della taglierina laser e le impostazioni dei componenti aggiuntivi hardware sono riepilogate nella tabella. Gli utenti posizionano il materiale nel letto, montano il componente aggiuntivo sulla testa laser utilizzando tre clip stampate in 3D, caricano i componenti nel vassoio e possono quindi eseguire il lavoro.

CONCLUSIONI

In questo progetto, abbiamo presentato una piattaforma di fabbricazione integrata in grado di creare rapidamente la geometria di un dispositivo, creare le sue tracce di circuito e assemblare componenti senza intervento manuale. Abbiamo dimostrato come possiamo potenziare un laser cutter esistente con un componente aggiuntivo hardware senza interfacciarsi con il firmware sottostante utilizzando una tecnica di segnalazione basata sul movimento che può informare l'add-on quando avviare e interrompere il suo funzionamento. Abbiamo illustrato i due componenti principali del nostro componente aggiuntivo hardware, ovvero un dispenser d'argento utilizzato per la creazione di tracce di circuiti e un meccanismo pick-and-place utilizzato per l'assemblaggio di componenti elettronici, e abbiamo mostrato che l'add-on può creare tracce ad alta risoluzione di alta conduttività e assemblare una gamma di diversi componenti elettronici. Abbiamo quindi presentato la saldatura laser, una tecnica che utilizza un laser CO2 per polimerizzare la pasta d'argento erogata e abbiamo discusso quali impostazioni di taglio laser sono più adatte per curare le tracce. Infine, abbiamo mostrato la nostra pipeline di progettazione e fabbricazione end-to-end composta da uno strumento di progettazione, uno strumento di visualizzazione e uno script di post-elaborazione che trasforma il file di progettazione in istruzioni macchina. Abbiamo anche mostrato applicazioni di esempio che includevano un quadricottero con attuatori, un bracciale con sensore avanzato e un PCB assemblato da transistor e resistori di base. Per il lavoro futuro, abbiamo in

programma di valutare la trasferibilità del nostro componente aggiuntivo a diverse macchine di taglio laser, studiare come migliorare il caricamento dei componenti e valutare diversi metodi per distribuire la logica di controllo su un dispositivo fabbricato.