

Miglioramento di algoritmi di elaborazione di immagini da scanner 3D tramite Simulated Annealing

Marco Derboni¹, Evelina Lamma¹, Antonio Zaccaro²

¹Dipartimento di Ingegneria, Via Saragat 1, 44122 Ferrara (FE), Italia
marco.derboni@student.unife.it, m.derboni@gmail.com,
evelina.lamma@unife.it

²Cefla Dental Group, via Bicocca 14/c, 40026 Imola (BO), Italia
antonio.zaccaro@cefla.it

Abstract. Nel lavoro si descrive l'applicazione di tecniche di IA per l'elaborazione e l'allineamento di immagini provenienti da scanner 3D, in grado di generare modelli digitali tridimensionali. Al fine di allineare più correttamente i fotogrammi acquisiti, in scansioni successive, dal dispositivo e ricostruire accuratamente il modello tridimensionale digitale, si è integrata la tecnica di Simulated Annealing, con un algoritmo di elaborazione di immagini (Iterative Closest Point, ICP) che allinea un nuovo fotogramma al modello già generato tramite roto-traslazioni consecutive.

Keywords. Ricerca euristica, Simulated Annealing, scanner 3D, registrazione, allineamento.

1 Introduzione

Nel corso degli anni, la necessità di poter manipolare e/o modificare un oggetto senza doverne alterare il reale stato fisico, oppure l'esigenza di volerne preservare le caratteristiche nel tempo in una forma imperturbabile, ha portato allo sviluppo di strumenti di scansione 3D sempre più sofisticati e complessi in grado di acquisire le informazioni relative alle geometrie, alle dimensioni, alle colorazioni di un oggetto sotto forma di modello digitalizzato tramite la tecnica del laser scanning. I sensori di acquisizione consentono di ottenere delle nuvole di punti che necessitano di un'accurata elaborazione.

L'obiettivo del lavoro presentato consiste nell'ottimizzare il processo di elaborazione di queste informazioni al fine di ricostruire, in modo migliorato, il modello tridimensionale digitalizzato dell'oggetto scansionato. Il caso di studio è stato proposto da Cefla Dental Group, ed è stato affrontato utilizzando tecniche di Intelligenza Artificiale.

Il dispositivo di acquisizione considerato è uno scanner intra-orale per la rilevazione dell'impronta digitale delle arcate dentali, da impiegarsi nel settore odontoiatrico, composto da una sonda, manovrata manualmente dall'operatore, e da un software di controllo e acquisizione. Una volta introdotto nel cavo orale, lo scanner 3D effettua la misurazione delle arcate dentali generando un modello tridimensionale topomorfológico del tutto analogo alla tradizionale impronta in silicone; il modello generato è utilizzato poi per realizzare un preciso manufatto protesico.

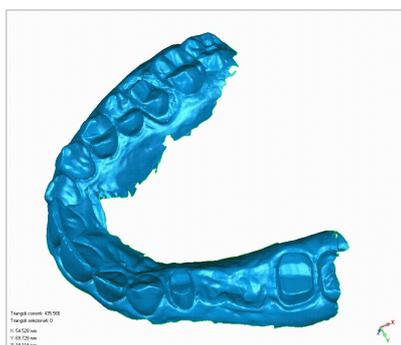


Fig. 1. Modello digitale 3D di un'arcata dentale

Per ottenere un modello corretto e preciso sono, in genere, necessarie più scansioni, ciascuna delle quali produce un'immagine tridimensionale parziale dell'oggetto stesso, quindi un dato volumetrico. I singoli fotogrammi devono essere elaborati attraverso opportuni algoritmi di elaborazione, per produrre un singolo modello tridimensionale dell'arcata scansionata. L'algoritmo di allineamento già utilizzato in Cefla Dental Group, l'Iterative Closest Point (ICP), ha il compito di confrontare la nuvola di punti del fotogramma in esame con quella del modello fino a quel momento generato; se esso individua una regione di sovrapposizione sufficiente riesce ad allineare il fotogramma al modello, in caso contrario attende un nuovo fotogramma e ripete il confronto. Quest'ultima situazione genera una perdita di continuità, cioè una momentanea interruzione del processo di creazione del modello che, conseguentemente, comporta una sospensione temporanea del processo di acquisizione. Se si desidera continuare la scansione, è necessario inquadrare l'ultima area correttamente registrata al modello stesso, in modo da consentire al sistema di riagganciare le scansioni.

Al fine di migliorare l'usabilità del dispositivo, si è pensato di far fronte al problema attraverso una procedura automatica che integra la tecnica del Simulated Annealing con l'algoritmo ICP, minimizzando le situazioni di imprecisione e migliorandone la *performance*, anche temporale.

Nell'articolo si descrive lo studio, la progettazione, la realizzazione e il testing di questa nuova metodologia di allineamento dei fotogrammi acquisiti da scanner tridimensionali, al fine di perfezionare, in termini di accuratezza e di qualità generale, il processo con cui vengono collezionati al fine di consentire l'ottenimento del modello tridimensionale della cavità orale.

2 Integrazione di Simulated Annealing e ICP

L'algoritmo Simulated Annealing [1] è un criterio basato su nozioni di meccanica statistica attraverso un'analogia con il comportamento di sistemi fisici durante il processo di raffreddamento. Ciò che ha influenzato l'implementazione di tale algoritmo è il processo fisico di formazione dei cristalli. Per realizzare un cristallo si parte da materiali grezzi allo stato fuso, la cui temperatura deve essere adeguatamente ridotta fino al momento in cui avviene un congelamento della struttura del cristallo stesso. Il raffreddamento deve avvenire molto lentamente per evitare la formazione di irregolarità al suo interno, quindi la temperatura deve essere abbassata in modo graduale attraverso una serie di livelli. Finché essa è maggiore dello zero assoluto sono sempre possibili variazioni in salita, al fine di evitare che la temperatura si discosti da quella compatibile con il livello energetico del livello corrente. Nel momento in cui viene raggiunto lo zero assoluto, tali variazioni diventano proibite, evitando in questo modo il generarsi di effetti indesiderati nella struttura del cristallo, in quanto nessuna transizione di stato può portare ad uno stato a più alta energia.

Il Simulated Annealing è la versione algoritmica di questo processo di solidificazione dei cristalli. Esso può essere visto come un'estensione della tecnica di ottimizzazione locale, in cui la soluzione iniziale è ripetutamente modificata attraverso piccole perturbazioni locali al fine di migliorarne lo stato. Questo processo mira a trovare un minimo globale quando si è in presenza di più minimi locali.

L'algoritmo Iterative Closest Point (ICP) ha il compito di allineare un fotogramma al modello tramite roto-traslazioni consecutive. L'implementazione utilizzata è stata ideata da Y. Chen e G. Medioni [2]. L'operazione è effettuata a partire da un preciso *starting point*, corrispondente alla regione di sovrapposizione dell'ultimo fotogramma correttamente registrato al modello, ed ha esito positivo solamente se la distanza tra il fotogramma ed il modello, espressa da un'opportuna funzione errore, è inferiore ad una determinata soglia. L'algoritmo associa delle coppie di punti, appartenenti rispettivamente al fotogramma e al modello, in base a dei criteri di distanza. La funzione errore è espressa dalla sommatoria delle distanze di queste coppie di punti. Ad ogni roto-traslazione il valore della sommatoria tenderà a diminuire a causa dell'avvicinamento del fotogramma al modello. Questo metodo raggiunge molto rapidamente un minimo, ma non sempre è quello globale, e quindi non corrisponde alla zona di corretto allineamento del fotogramma. Se uno di questi minimi locali è maggiormente adiacente allo *starting point* della scansione corrente rispetto al minimo globale, può accadere che le roto-traslazioni introdotte dall'ICP trascinino la nuvola di punti appartenente alla scansione stessa in una di queste zone.

Simulated Annealing è in grado di sfuggire ai minimi locali, quindi è un algoritmo robusto, tuttavia estremamente lento a convergere al minimo globale, quindi inefficiente. Al contrario, ICP è molto efficiente, ma trova ostacoli nei minimi locali. Da queste considerazioni, nasce l'idea di sviluppare una tecnica ibrida [3] in cui vengono accostati i due metodi al fine di trovare una soluzione ottima al problema.

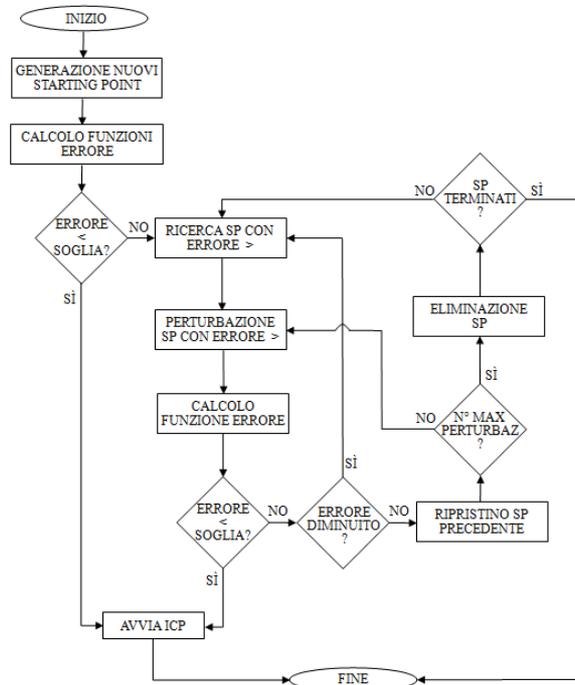


Fig. 2. Schema a blocchi dell' algoritmo Simulated Annealing

L' algoritmo Simulated Annealing ha infatti il compito di trovare uno *starting point* migliore di quello utilizzato da ICP, per portare a termine la registrazione della nuvola di punti acquisita che, in caso contrario, sarebbe immediatamente scartata. Nella situazione favorevole in cui venga effettivamente trovato uno *starting point* migliore, il controllo torna all' algoritmo ICP che effettua l' allineamento vero e proprio.

Il primo passo dell' algoritmo consiste nel generare un insieme di sei nuovi *starting point*, ognuno dei quali differisce dall' originale per una differente traslazione su un asse di riferimento, calcolando al tempo stesso la relativa funzione errore. Se già in questa prima fase si identifica uno *starting point* in grado di soddisfare i requisiti per l' allineamento, cioè se la funzione errore risulta inferiore ad una determinata soglia, si interrompe il Simulated Annealing e si avvia immediatamente l' ICP, che riceve in ingresso lo *starting point* da cui iniziare le operazioni di allineamento.

Altrimenti, si avvia la seconda fase dell' algoritmo: si seleziona lo *starting point* con errore associato maggiore e si effettua per esso una perturbazione alla relativa matrice di traslazione attraverso una distribuzione di probabilità gaussiana. Il valore della varianza della gaussiana, quindi dell' ampiezza della perturbazione, dipende dalla temperatura del sistema, che diminuisce o aumenta in base al valore della funzione errore e del numero di perturbazioni consecutive senza successo effettuate sullo *starting point* in esame. In seguito ad una perturbazione infatti, se uno *starting point* peggiora il suo stato, la temperatura aumenta per consentire un movimento più ampio. In base alla temperatura dipende perciò la probabilità di effettuare una perturbazione

più o meno incisiva. Successivamente si ricalcola la funzione errore e , anche in questo caso, se il valore è inferiore ad una determinata soglia si riavvia l'ICP, altrimenti si controlla la variazione del valore della funzione errore: se esso è diminuito si reiterano le operazioni descritte e si procede con un'ulteriore perturbazione del nuovo *starting point* peggiore; altrimenti si ripristina lo *starting point* precedente.

Al fine di interrompere l'algoritmo nel caso in cui tutti gli *starting point* non sono in grado di trovare una buona convergenza, è stato introdotto un valore limite sul numero di perturbazioni effettuate per ogni *starting point*: se si oltrepassa tale valore, lo *starting point* in esame non è più considerato, altrimenti si procede con un'ulteriore perturbazione. Se nessuno *starting point* è considerato idoneo, si interrompe prematuramente l'algoritmo; altrimenti si reitera il procedimento. L'interruzione dell'algoritmo tuttavia non compromette l'intero processo di creazione del modello digitale; se il Simulated Annealing non riesce a fornire all'ICP uno *starting point* alternativo per allineare il fotogramma al modello, il fotogramma viene semplicemente rigettato, come avviene per la versione originale dell'ICP, ed il controllo torna all'ICP stesso, che riceverà in ingresso dallo scanner un nuovo fotogramma da allineare al modello.

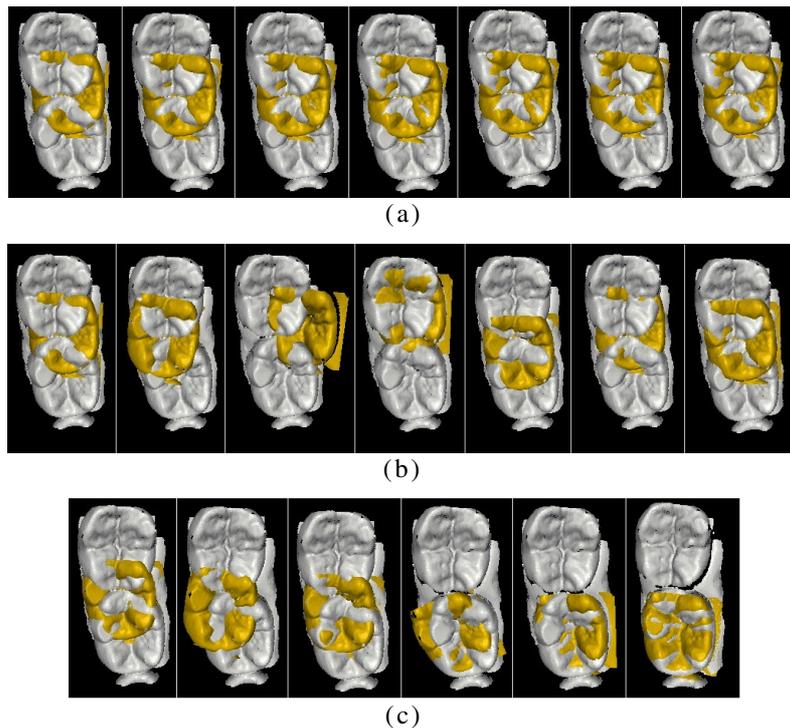


Fig. 3. (a) Sequenza rototraslazioni ICP (fallimento algoritmo originale); (b) Nuvola di starting point (prima fase Simulated Annealing); (c) Perturbazioni favorevoli del Simulated Annealing e successo dell'algoritmo.

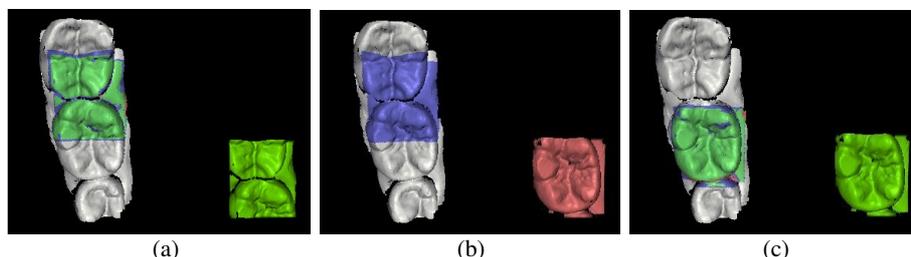


Fig. 4. (a) Ultimo allineamento corretto che precede la perdita di continuità; (b) ICP: allineamento del fotogramma non riuscito; (c) Simulated Annealing: allineamento del fotogramma riuscito.

3 Sperimentazione e risultati

Al fine di verificare i miglioramenti apportati dall'integrazione del Simulated Annealing e ICP per il caso considerato, sono stati raccolti ed esaminati diversi *dataset* di acquisizioni effettuate attraverso lo scanner intra-orale. I dati raccolti al fine di valutare l'adeguatezza dell'algoritmo si sono concentrati sull'analisi dei seguenti parametri: numero di situazioni in cui l'Iterative Closest Point non riesce a convergere adeguatamente; numero di successi del Simulated Annealing, sia nella prima fase di generazione della nuvola di *starting point*, sia nella seconda fase in cui vengono effettuate le perturbazioni; numero di fallimenti del Simulated Annealing; numero di fallimenti dell'ICP in seguito a successi del Simulated Annealing; tempistiche di esecuzione. La sperimentazione effettuata ha condotto ai seguenti risultati:

- nella maggior parte delle situazioni il numero di successi dell'algoritmo è nettamente superiore al numero di fallimenti;
- i maggiori benefici apportati sono pertinenti a perdite di continuità dovute a scostamenti del dispositivo che variano principalmente lo stato della matrice di traslazione, infatti il metodo non modifica gli angoli di rotazione;
- l'algoritmo implementato riesce a trovare già nella prima fase, in numerose situazioni, uno *starting point* adeguato da fornire all'ICP;
- in rare circostanze si verificano situazioni in cui nonostante il Simulated Annealing ha apparentemente trovato uno *starting point* adatto al corretto allineamento del fotogramma, l'ICP non è in grado di raggiungere la convergenza globale. Tuttavia ciò non influenza negativamente l'accuratezza del modello finale;
- in caso di successo nella prima fase, l'algoritmo converge molto rapidamente, in media circa 30 ms, mentre nella seconda fase il tempo medio risulta essere all'incirca di un ordine di grandezza superiore. Le situazioni peggiori si riscontrano in caso di fallimento dell'algoritmo, in cui il tempo si attesta attorno a 1500 ms (i valori devono essere considerati solamente per un'analisi della correttezza dell'algoritmo in quanto sono stati rilevati mediante un PC con processore Core Duo 2.20GHz, mentre i requisiti minimi richiederebbero un processore Core Duo 2.40GHz).

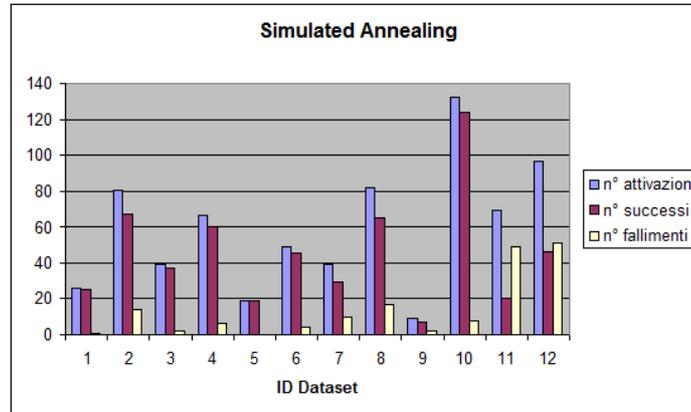


Fig. 5. Simulated Annealing: attivazioni, successi e fallimenti

4 Conclusioni

L'integrazione della tecnica Simulated Annealing con l'algoritmo ICP si è rivelata un'ottima soluzione per far fronte al problema delle perdite di continuità dello scanner intra-orale considerato. In particolare, grazie all'identificazione del minimo globale di una funzione, Simulated Annealing è in grado di subentrare egregiamente nelle situazioni in cui l'Iterative Closest Point fallisce. Il metodo si è rivelato affidabile ed in grado di evitare le perdite di continuità nella maggioranza delle situazioni esaminate, condizione necessaria al fine di migliorare l'usabilità del dispositivo medico.

Tuttavia, al fine di rendere l'applicazione sufficientemente rapida per un utilizzo real-time, è consigliato l'utilizzo di tale algoritmo attraverso una procedura che opera in background al fine di evitare situazioni di interruzione temporanea generate dalla complessità di calcolo dell'algoritmo, evitando pertanto di sospendere la sequenza di acquisizioni. Il processo deve essere celato all'utilizzatore allo scopo di far recuperare la continuità automaticamente mentre lo scanner è in fase di acquisizione continua, senza quindi richiedere un intervento a livello fisico da parte dell'utilizzatore.

Riferimenti bibliografici

1. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi M. P., "Optimization by Simulated Annealing," Science, New Series, Vol. 220, No. 4598, 1983.
2. Chen, Y. and Medioni, G. "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images," Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, 1991.
3. Luck, J., Little, C., Hoff, W., "Registration of Range Data Using Hybrid Simulated Annealing and Iterative Closest Point," Proc. Of IEEE International Conference of Robotics and Automation, San Francisco, April 24-28, 2000.