



UNIVERSITÀ DI PISA

***DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA, DEI SISTEMI,
DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI***

***RELAZIONE PER IL CONSEGUIMENTO DELLA
LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE***

***Sviluppo di un sistema di realtà aumentata per
migliorare l'efficienza delle operazioni di assemblaggio
dei componenti di carrozzeria di autovetture***

SINTESI

RELATORI

*Prof. Ing. Gino Dini
DICI – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Industriale*

*Ing. Michela Dalle Mura
DICI – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Industriale*

IL CANDIDATO

Filippo Antonelli

Sviluppo di un sistema di realtà aumentata per migliorare l'efficienza delle operazioni di assemblaggio dei componenti di carrozzeria di autovetture

Filippo Antonelli

SOMMARIO

Il lavoro svolto durante il periodo di tesi ha riguardato l'analisi delle criticità relative alle operazioni di assemblaggio dei componenti di carrozzeria sulla scocca delle autovetture, con particolare attenzione alla necessità di garantire la correttezza del loro posizionamento valutato in termini di "gap" e "flushness" rispetto ai componenti adiacenti.

Lo studio delle tecnologie e dei software riguardanti la realtà aumentata ha permesso lo sviluppo di un sistema basato sul software *development kit Unity e Augmented Reality Engine Vuforia*, che supporta l'operatore nelle fasi di assemblaggio e regolazione.

L'applicativo sviluppato permette di guidare l'operatore in ogni step previsto dalla procedura di montaggio fornendo indicazioni puntuali generate da un algoritmo interno tramite l'interfaccia grafica interattiva.

Il sistema è stato sviluppato e successivamente testato tramite un'attrezzatura appositamente progettata e realizzata al fine di simulare l'assemblaggio della parte anteriore di una vettura comprendente parafrangente laterale, paraurti, cofano e proiettore.

ABSTRACT

The work carried out during the thesis period concerned the analysis of the critical issues relating to the assembly operations of body components on passenger cars, with particular attention to the need to ensure the correctness of their positioning, assessed in terms of gap and flushness with respect to the adjacent components.

The study of technologies and software relating to the augmented reality has allowed the development of a system based on the software *development kit Unity and the Augmented Reality Engine Vuforia*, which supports the operator in the assembly and adjustment phases.

The developed application guides the operator in each step of the assembly procedure providing precise indications generated by an internal algorithm via the interactive graphic interface.

The system was developed and subsequently tested using specially designed equipment designed to simulate the assembly of the front part of a car including a side mudguard, bumper, hood and headlamp.

1 – Introduzione

L'assemblaggio dei componenti di carrozzeria sulle autovetture è quella fase di assemblaggio che consiste nel posizionare ed assicurare alla struttura portante i componenti che compongono la carrozzeria.

In generale si considera un componente “ben posizionato” se rispetta le tolleranze imposte, così da soddisfare i requisiti estetici e funzionali richiesti.

Un posizionamento corretto dei componenti di carrozzeria è un elemento chiave che, se disatteso, può portare a conseguenze estetiche e tecniche considerevoli che saranno in seguito approfondite.

Al contempo, l'esecuzione di questa fase di assemblaggio, tipica del settore automotive, risulta essere caratterizzata da un notevole dispendio in termini di tempo e da una forte dipendenza tra il risultato raggiungibile e l'esperienza dell'addetto che esegue l'operazione.

A tal proposito, con il lavoro svolto, si è cercato di sviluppare un sistema che risolva al meglio questi due aspetti critici sfruttando la realtà aumentata integrata in un sistema che ha il compito di determinare la regolazione da effettuare su un componente e successivamente comunicarla nella maniera più efficiente possibile all'operatore.

2 – L'automotive Panel Fitting

La carrozzeria di una autovettura risulta composta da una serie di componenti affiancati tra loro con uno spazio, sempre presente, che li separa. In gergo il passaggio da un componente all'altro viene identificato con il nome di “Cutline”.

Lungo ogni “cutline” possono essere identificati dei punti, detti “Control Point”, che identificano la regione in cui avviene la misurazione di interesse per la determinazione della posizione relativa tra i componenti.

Le suddette misurazioni possono interessare due diverse grandezze (Figura 2.1):

- *Gap o clearance*: cioè la distanza che separa due componenti di carrozzeria
- *Flushness o levelness*: dislivello tra la superficie di pannelli adiacenti

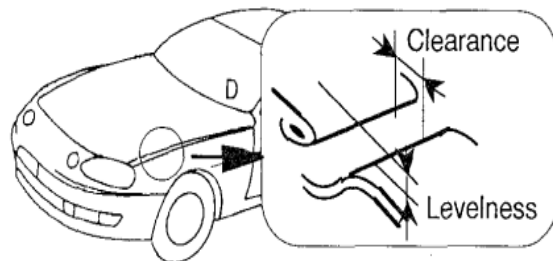


Figura 2.1 – Definizione di gap e flushness.

Le cause di un posizionamento imperfetto dei componenti sulla scocca dell'autovettura sono da ricercarsi all'interno dei processi di Design, Produzione ed Assemblaggio così come mostrato nel diagramma ad albero in Figura 2.2:

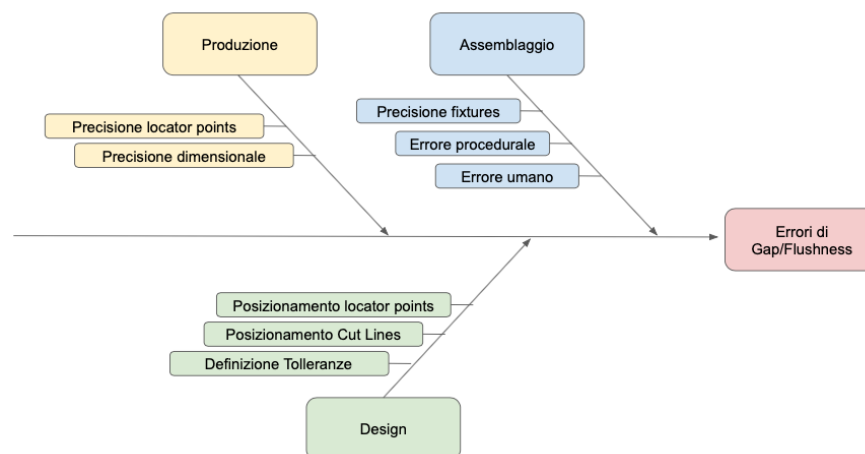


Figura 2.2 – Diagramma di Ishikawa relativo alle cause di un errato posizionamento dei componenti di carrozzeria.

Attualmente le operazioni di montaggio dei componenti di carrozzeria sulle vetture possono essere svolte principalmente nei tre modi seguenti:

- *Assemblaggio interamente manuale:*
Soluzione che prevede lo svolgimento di tutte le operazioni da parte degli addetti al montaggio.
Durante una fase generica di assemblaggio di un componente di carrozzeria, l'operatore preleva il pezzo da un apposito supporto e lo posiziona nell'apertura prevista sulla scocca della vettura.
A questo punto sono inserite e parzialmente avvitate le viti che bloccheranno il pannello senza però essere serrate completamente. Il posizionamento corretto del pannello si effettua con l'utilizzo di uno spessore di dimensioni tollerate che viene inserito tra il pannello da montare e quello adiacente. A questo punto l'operatore può serrare le viti e l'assemblaggio è completato.
La regolazione della posizione è resa possibile grazie al generoso gioco previsto tra la vite ed il foro realizzato nel pannello.
- *Assemblaggio manuale utilizzando attrezzature mobili:*
Per alcune parti della carrozzeria più ingombranti e pesanti possono essere utilizzate delle "attrezzature mobili" che compensano peso ed inerzia dei componenti durante le loro movimentazioni e sono talvolta dotati di dispositivi per l'avvitatura o la rivettatura automatizzata.
- *Assemblaggio automatizzato:*
Solitamente la scocca dell'auto avanza su un binario fino a giungere all'interno di una cella in cui lavorano molteplici robot articolati che prelevano, posizionano e fissano in posizione i componenti.

Gli strumenti utilizzati per settare o misurare i parametri di gap e flushness tra due pannelli di carrozzeria adiacenti sono:

- *Dime:*
Si tratta di semplici spessori da interporre tra due componenti fissando il gap tra di essi. Questo strumento, oltre che durante il montaggio, viene utilizzato anche per effettuare misurazioni di controllo di tipo passa-non passa.
- *Calibri e comparatori:*
Nel caso in cui il profilo dei componenti da misurare lo consenta e limitatamente a vetture non ancora verniciate, le misurazioni di gap possono essere rilevate utilizzando i becchi per interni dei comuni calibri a corsoio.
Le misurazioni di flushness possono invece essere effettuate utilizzando un comparatore montato su attrezzature appositamente costruite.
- *Strumenti elettronici:*
Costituiti da sistemi di visione e sensori di distanza laser che permettono la rilevazione congiunta di gap e flushness in automatico e senza contatto.

Si ritiene che l'operatore, durante la fase in cui la posizione dei componenti deve essere settata con precisione, possa beneficiare di istruzioni puntuali relative alle regolazioni da apportare.

È fondamentale però che la comunicazione di queste istruzioni sia effettuata nel modo più efficace ed efficiente possibile. A tal proposito, una tecnologia relativamente nuova che può essere utilizzata per questo fine è costituita dalla realtà aumentata.

3 – La realtà aumentata

La realtà aumentata, o *Augmented Reality* (AR), può essere definita come uno strumento per il potenziamento della percezione visiva dell'uomo, tramite la sovrapposizione di contenuti digitali al mondo reale ottenuto tipicamente attraverso un software e un dispositivo di visione.

In un sistema di realtà aumentata i contenuti virtuali sono posizionati in sovrapposizione all'immagine reale rispetto a punti di riferimento stabiliti. Ad oggi, i sistemi più diffusi si affidano a tecniche di analisi dell'immagine per l'identificazione di tali punti di riferimento, denominati "target". A seconda del tipo di target utilizzato si possono distinguere:

- *Fiducial Marker Identification*:
In questo caso i target sono costituiti da "marker", solitamente immagini artificiali, che vengono riprodotte su un supporto e apposte sulle strutture reali.
- *Markerless Identification*:
Riconoscono l'oggetto ricercato comparandolo con modelli 3D presenti in un database.
- *Natural Feature Identification*:
Utilizzano *feature* distintive presenti sull'oggetto (es. bordi, spigoli, colori, fori, texture) al fine di identificarlo all'interno dell'ambiente circostante.

Per applicazioni di AR, l'attenzione maggiore, per quanto riguarda i device di I/O, ricade sui dispositivi di visione dove si concretizza la sovrapposizione tra mondo reale e virtuale. Tra questi si distinguono:

- *Head Mounted Device (HMD)*: dispositivo che l'utente indossa sulla testa, solitamente realizzato in forme riconducibili a occhiali o elmetti.
All'interno di questa categoria di distinguono a loro volta dispositivi di tipo:
 - *Video See – Through (VST)*: il device consente all'utilizzatore di vedere l'ambiente circostante arricchito dei contenuti virtuali tramite degli schermi posizionati frontalmente e a distanza ravvicinata degli occhi.
 - *Optical See – Through (OST)*: device realizzati con lenti trasparenti o semitrasparenti: l'utilizzatore vede direttamente l'ambiente circostante e i contenuti di realtà aumentata vengono proiettati sulla lente.
- *Projection – Based Display*: sono costituiti generalmente da monitor fissi o da proiettori.
- *Handheld Display*: costituiti da smartphone o tablet di utilizzo comune.

Servendoci dello schema mostrato di seguito in Figura 3.1, possiamo fare il punto su quali possano essere i metodi ed i benefici auspicabili nel campo del montaggio tramite l'uso di applicazioni di realtà aumentata.

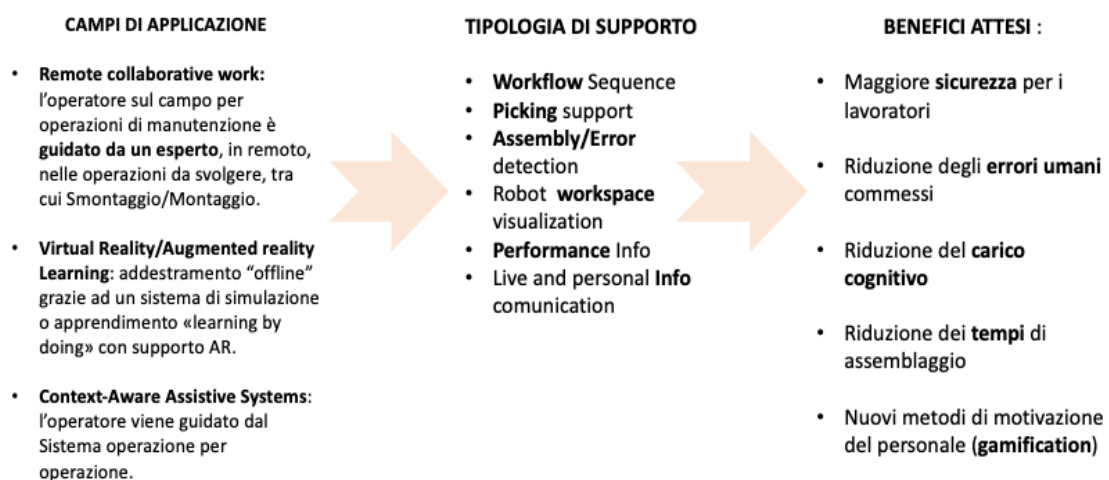


Figura 3.1 – Campi di applicazione, forme di assistenza all'operatore e benefici attesi della realtà aumentata a supporto di operazioni di montaggio.

Lo scopo del lavoro svolto durante il periodo di tesi è quello di realizzare un sistema che determini le regolazioni necessarie da apportare ad un componente di carrozzeria il cui posizionamento risulti essere fuori tolleranza e che successivamente guidi l'operatore sfruttando la realtà aumentata per la comunicazione delle istruzioni necessarie.

Per raggiungere l'obiettivo è stata implementata la metodologia riassunta in Figura 3.2 e successivamente dettagliata nel presente documento.

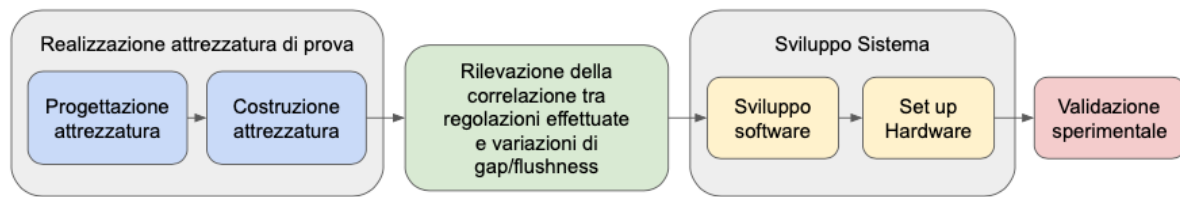


Figura 3.2 – Metodologia seguita per lo sviluppo del sistema.

4 – Progettazione e realizzazione attrezzatura di prova

Al fine di poter condurre delle prove sul sistema di realtà aumentata e simulare al meglio l'ipotetico ambiente di lavoro che si avrebbe in un'applicazione industriale è stato ritenuto necessario progettare e realizzare una riproduzione della parte relativa all'avantreno lato passeggero di una comune vettura in commercio.

L'attrezzatura finale è composta da due parti fondamentali:

- *Componenti di carrozzeria*, della vettura reale, in particolare cofano motore, proiettore anteriore, parafrangente e paraurti.
- *Sistema di supporti e strutture*, regolabili e non, che permettano di posizionare nello spazio i componenti al punto precedente.

La progettazione è iniziata definendo i requisiti d'uso che la struttura avrebbe dovuto rispettare e successivamente si è passati alla modellazione sul software Solidworks di tutti gli elementi che caratterizzano l'area di lavoro: componenti di carrozzeria, banco di assemblaggio, struttura di supporto per i componenti, altri elementi accessori come monitor pc, tastiera, mouse, ecc.

Una volta completata la fase di modellazione gli elementi sono stati affiancati l'uno all'altro ricreando la postazione di lavoro virtuale all'interno del software di progettazione.

La struttura finale realizzata è caratterizzata da un posizionamento fisso per i componenti di cofano, parafrangente e paraurti mentre permette la regolazione del proiettore grazie a dei registri appositamente realizzati di cui un esempio è mostrato in Figura 4.1.

Una vista della struttura di supporto è mostrata invece in Figura 4.2 dove sono inoltre evidenziati i supporti di montaggio (Mounting Point, MP) ai quali il proiettore è ancorato.



Figura 4.1 – Modello 3D del registro di montaggio (a); Registro di montaggio reale (b).

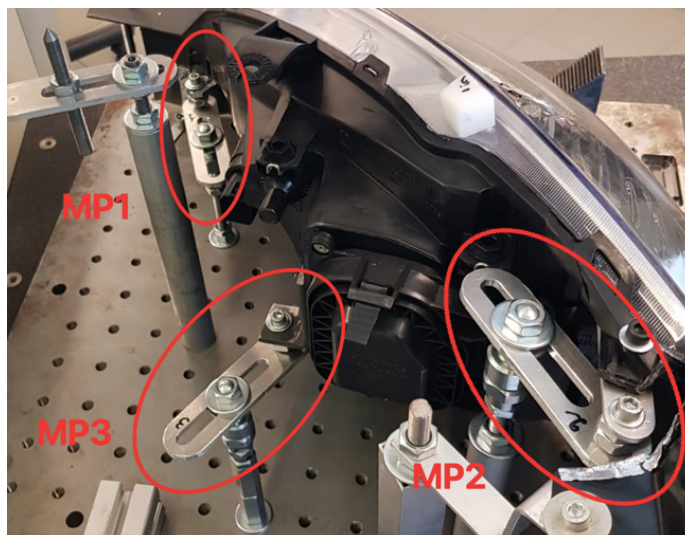


Figura 4.2 – Dettaglio delle strutture di posizionamento del proiettore. In evidenza i tre Mounting Point (MP) utilizzati.

5 – Correlazione tra regolazioni e variazioni di gap/flushness

Al fine di determinare la correlazione tra la movimentazione dei registri sui supporti di montaggio e l'effettiva variazione di gap e flushness in corrispondenza dei bordi del proiettore, sono state effettuate delle misurazioni, utilizzando la macchina CMM a disposizione in dipartimento (Figura 5.1).

Lungo ogni cutline sul bordo del proiettore sono stati identificati due punti di controllo.

In corrispondenza dei punti identificati sono state effettuate due tipologie di misurazione:

- Tastatura in direzione ortogonale alla superficie del proiettore, per valutare le variazioni di flushness;
- Tastatura di riscontri aggiuntivi apposti sul bordo del proiettore per valutare variazioni di gap.

La procedura di tastatura descritta è stata ripetuta per ogni combinazione di regolazione dei tre supporti di montaggio.

Le coordinate dei punti acquisiti in questo modo sono state infine confrontate con quelle rilevate con il proiettore in posizione considerata corretta, effettuando il calcolo di distanza tra due punti.

I valori così ottenuti sono stati aggregati in una tabella, di cui se ne mostra solo la parte iniziale in Figura 5.1, in cui si fanno corrispondere le posizioni assunte dai registri (codificate nelle prime tre colonne) alle variazioni effettive di flushness e gap ad ogni punto di controllo (CP, control point).

Facendo riferimento alla riga in evidenza si evince che, portando tutti i registri di montaggio nelle posizioni codificate "1", si ottiene una variazione in termini di flushness pari a 2,62mm in corrispondenza del punto di controllo 1 (CP1), 3,24mm al punto di controllo 2 e così via.

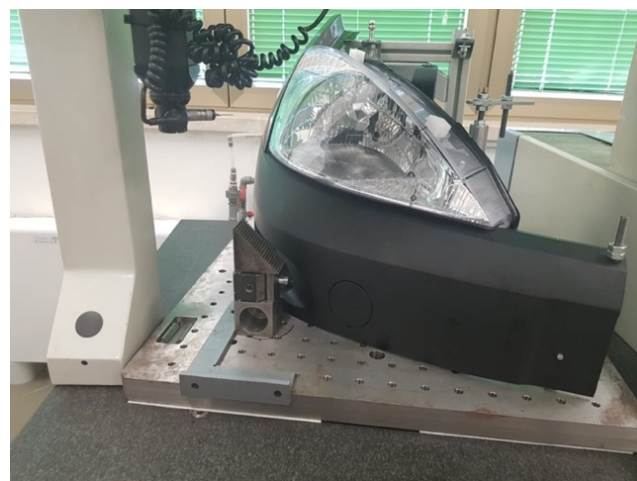


Figura 5.1 - Acquisizione delle coordinate dei punti di controllo con macchina CMM.

MOUNTING POINT			FLUSHNESS correction						GAP correction					
MP1	MP2	MP3	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
-2	-2	-2	0,22	1,37	-2,07	-2,10	0,98	0,50	-0,35	-0,86	4,41	3,68	2,95	-2,80
2	2	2	1,59	0,21	-0,41	0,36	0,19	0,91	2,33	3,78	-1,02	3,44	-3,80	5,62
-3	-3	-3	0,67	0,58	-0,98	-1,50	1,13	0,55	-1,28	-1,88	0,61	1,18	3,11	-1,71
3	3	3	3,42	1,32	0,78	-0,47	0,74	1,94	2,04	2,66	-1,41	1,19	-3,31	5,68
1	1	1	2,62	3,24	3,58	4,47	5,88	4,99	-5,97	-5,24	1,15	0,37	-2,10	1,52
-1	-1	-1	0,59	0,77	-1,35	-2,71	4,96	3,45	4,09	4,18	-1,25	2,11	-0,05	-0,57
1	0	0	2,39	3,48	2,55	1,92	2,26	3,32	-7,52	-7,06	3,80	1,66	1,73	-3,01

Figura 5.1 – Tabella di correlazione tra le regolazioni dei registri di montaggio e l'effettiva variazione di gap e flushness in corrispondenza di ogni punto di controllo.

La tabella appena descritta sarà di fondamentale importanza per il funzionamento del software in quanto permetterà l'identificazione della direzione di regolazione da applicare ai registri al fine di correggere eventuali errori di posizionamento che interessano il componente.

6 – Sviluppo sistema dotato di tecnologia

Il software è stato sviluppato utilizzando il SDK Unity e l'Augmented reality engine Vuforia. La parte relativa al codice, in linguaggio C# è invece stata gestita tramite il software Visual Studio. Il sistema funziona su piattaforma “stand-alone” PC/Mac ed è stata inoltre sviluppata una versione per dispositivi mobili con sistema operativo Android.

La gestione dei contenuti di realtà aumentata avviene tramite il riconoscimento di marker fiduciali (marker based) che sono stati appositamente scelti, dimensionati e posizionati sulla struttura.

Durante tutto il processo di sviluppo si è cercato, per quanto possibile, di garantire la compatibilità dei dati in un'ottica di integrazione con altri sistemi eventualmente presenti in contesti aziendali.

Il funzionamento base del sistema può essere sinteticamente rappresentato tramite un diagramma di flusso mostrato in Figura 6.1: i dati relativi a gap e flushness misurati sulla vettura sono immessi nel sistema che inizia la computazione per stabilire lo scostamento dalla posizione ottimale e le regolazioni che dovranno avvenire su ogni supporto di montaggio per riportare il componente in tolleranza. A questo punto la procedura che guida l'operatore con elementi di realtà aumentata può essere avviata.

Una volta conclusa la regolazione, viene ripetuta una seconda misurazione di gap e flushness lungo il profilo del componente. Nel caso in cui i valori rilevati rientrino nel range di accettabilità la procedura è conclusa. In caso contrario il sistema riparte con una successiva iterazione del procedimento appena descritto.

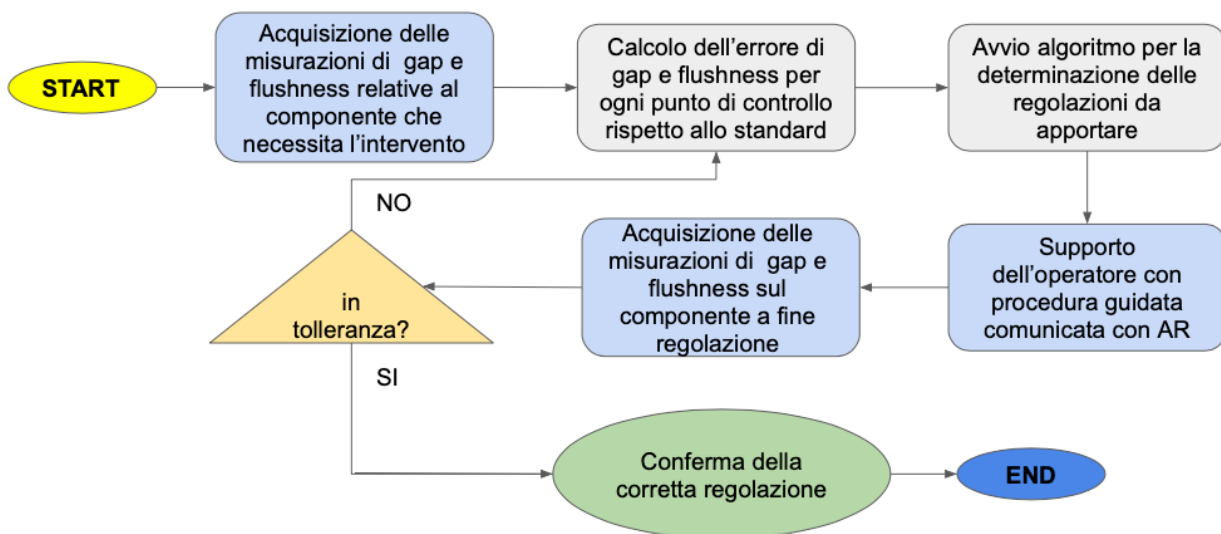


Figura 6.1 – Funzionamento di base del software.

La computazione dei dati viene portata a termine utilizzando un algoritmo che confronta la posizione corretta del componente con quella misurata. In questo modo è possibile ottenere un vettore di dati che rappresenta gli errori di gap e flushness ad ogni punto di controllo. A questo punto il software sceglie all'interno della tabella di Figura 4.4 la regolazione che compensa al meglio gli errori rilevati. La combinazione scelta sarà quella che consente di ottenere un errore residuo totale minore tra tutte quelle possibili. L'errore residuo totale, per ogni riga della tabella in Figura 4.4, è calcolato come segue:

$$ERR_{res} = \sum_{i=1}^6 (FLerr_i + FL_i) + \sum_{i=1}^6 (GAPerr_i + GAP_i)$$

Dove:

“i”, identifica il CP; “FLerr” e “GAPerr”, rappresentano gli errori di gap e flushness del componente; “FL” e “GAP”, rappresentano la correzione di gap e flushness contenute nella riga corrispondente.

Un possibile layout di come l'applicazione descritta può essere implementata in un contesto industriale è rappresentato in Figura 6.2. Come si nota, nella parte terminale della linea di assemblaggio delle vetture è posto un robot articolato sul cui polso è montato un sensore per la rilevazione automatica di gap e flushness. Viene così verificato il corretto posizionamento dei componenti di carrozzeria, in particolare, nell'immagine mostrata, la misurazione interessa il proiettore anteriore.

Nel caso in cui i valori rilevati risultino fuori tolleranza, l'operatore, utilizzando il software sviluppato, inizierà la procedura di regolazione seguendo le istruzioni visualizzate sul dispositivo HMD. L'applicativo viene eseguito su di un computer portatile che scarica i dati necessari da un database, li analizza, e tramite i cablaggi invia l'immagine al dispositivo di visione.

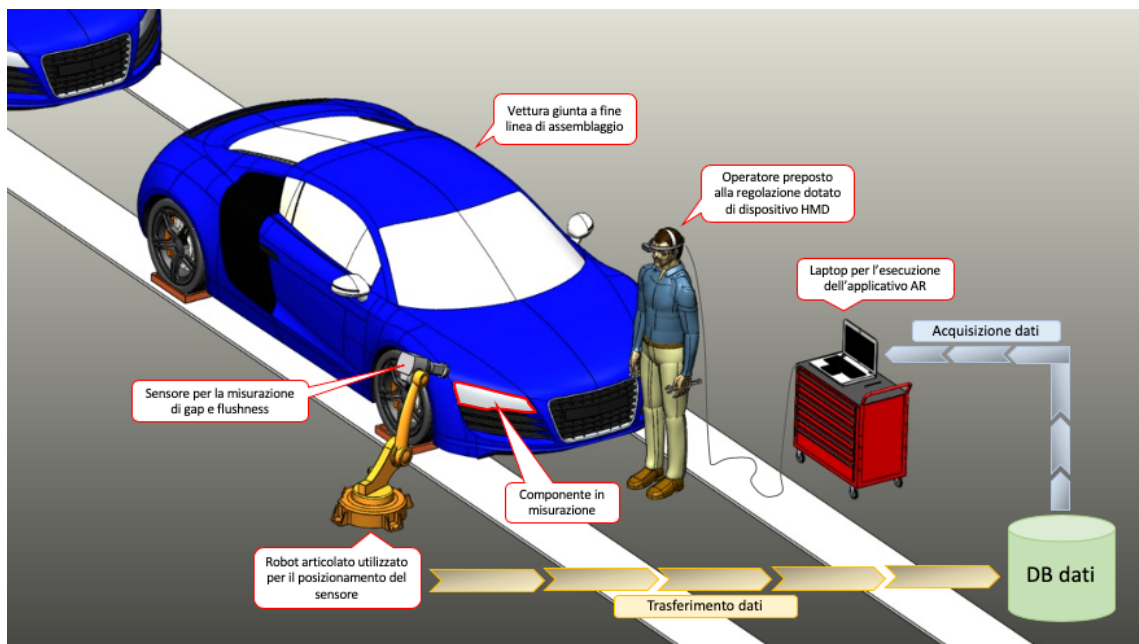


Figura 6.2 – Esempio di applicazione del sistema integrato con dispositivo di misurazione automatizzata.

Durante la programmazione del software è stata appositamente sviluppata un'interfaccia interattiva tramite la quale è possibile l'interazione tra il sistema e l'operatore. La maggior parte degli elementi presenti è stata realizzata in semitrasparenza in modo da bloccare il meno possibile la vista dell'operatore rimanendo comunque perfettamente leggibili. Un'immagine esemplificativa è mostrata in Figura 6.3.

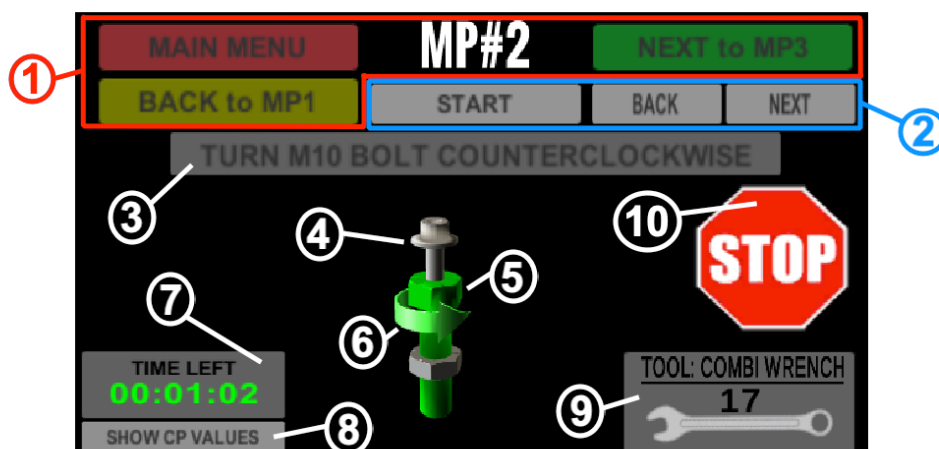


Figura 6.3 – Esempio schermata relativa ad uno step della procedura guidata: Tasti di navigazione (1 – 2); Istruzione testuale relativa all'operazione da compiere (3); Modello 3D del registro di montaggio (4 – 5 – 6); Timer (7); Tasto di accesso alle misurazioni di gap e flushness (8); Identificazione strumento da utilizzare (9); Segnale di stop di raggiungimento della posizione finale (10).

Oltre alla modalità di funzionamento base del software, tramite la quale l'operatore è guidato durante la fase di regolazione, sono state implementate altre funzionalità accessorie in quanto ritenute necessarie per garantire la completezza del sistema.

Alcune tra le più rilevanti sono: la modalità "esplorativa" in cui i supporti di montaggio del proiettore della vettura sono evidenziati dal software facilitando la loro individuazione da parte dell'operatore; una procedura di taratura della posizione del dispositivo di visione che ne garantisce il corretto allineamento rispetto all'occhio dell'utente; la possibilità di esecuzione degli step della procedura in modalità manuale, attendendo il consenso dell'operatore, o in modalità automatica; la funzionalità di riconoscimento, da parte del sistema, di eventuali errori commessi dall'utente; la visualizzazione delle aree di lavoro dei robot presenti nell'ambiente circostante.

7 – Testing di utilizzo del sistema

Il lavoro di tesi si è concluso con una fase di validazione, nella quale il sistema è stato testato sull'attrezzatura realizzata al fine di verificarne il corretto funzionamento ed identificare eventuali modifiche da apportare.

In particolare, è richiesto che: il sistema determini correttamente la regolazione da apportare al proiettore in funzione della sua posizione iniziale; la procedura guidata che supporta l'operatore avvenga senza interruzioni improvvise del software; la sequenza delle operazioni da compiere sia corretta in relazione alla regolazione da apportare; il posizionamento e la resa dei contenuti di realtà aumentata avvenga in modo da garantire una comunicazione efficace ed efficiente delle istruzioni. Le istruzioni devono quindi essere delle giuste dimensioni, facilmente identificabili e visibili dall'operatore.

Al termine della procedura guidata di regolazione il proiettore dovrà trovarsi in una posizione tale da rispettare le tolleranze ad esso associate. Per verificare la conformità rispetto a quest'ultimo requisito dovranno essere ripetute le misurazioni di gap e flushness, in ogni control point.

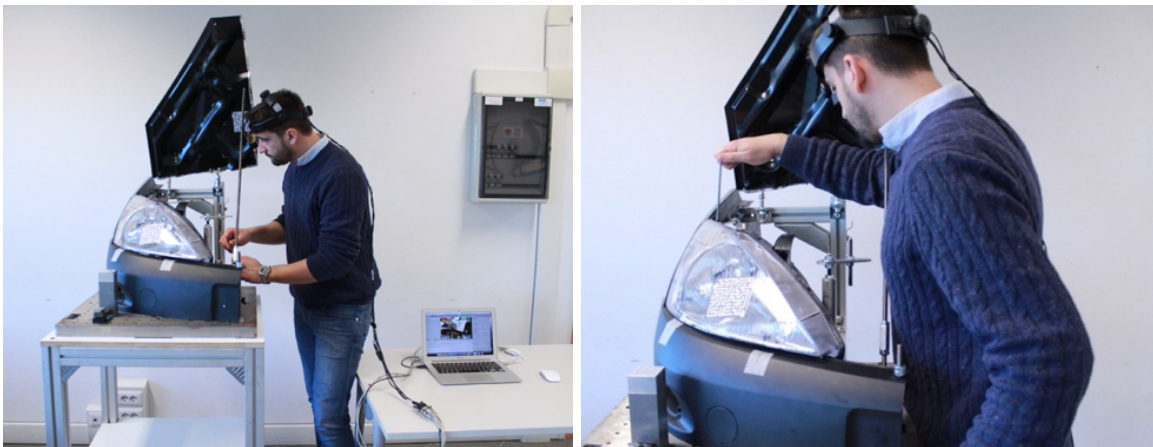


Figura 7.1 - Set up utilizzato durante il testing del sistema.

Il testing del sistema, come mostrato in Figura 7.1 è stato condotto utilizzando come:

- **Hardware:**
 - Sistema di visione di tipo HMD See Through olografico mono-oculare;
 - Computer portatile con sistema operativo Mac OSx;
 - Dispositivi di Input/Output: mouse wireless e tastiera.
- **Software:**
 - Unity in modalità di "Play" per l'esecuzione del software;
 - Software "OBS" per la processazione dell'immagine destinata al visore ed eventuale registrazione della procedura.
- **Attrezzatura di test (Descritta nella sezione n.4):**

Sulla struttura, partendo dalla posizione di proiettore correttamente montato, viene indotto un errore generato casualmente.

Le misurazioni di gap e flushness in questa fase sono ottenute tramite l'utilizzo di un profilometro ad aghi. La scelta è ricaduta su questo strumento per la sua semplicità e l'immediatezza con le quali può essere utilizzato rispetto all'impiego di sensori o altri sistemi complessi che avrebbero richiesto un considerevole dispendio in termini di tempo per il loro setup.

Questo strumento permette la rilevazione del profilo di transizione tra due componenti grazie al quale è possibile rilevare le misurazioni di interesse, ovvero gap e flushness; il profilometro viene fotografato, applicando una procedura di processazione manuale dell'immagine, analoga a quella impiegata nei sistemi di visione precedentemente menzionati.

Il software utilizzato in questa fase è Solidworks.

I dati ottenuti sono successivamente immessi nel software grazie all'apposita schermata.

A questo punto è possibile avviare la procedura guidata di regolazione della quale sono mostrate le immagini relative alle operazioni da compiere intervenendo sul supporto di montaggio n.2:

a. Figura 7.2: Rilascio Vite M6, componente "a" di Figura 4.1a.

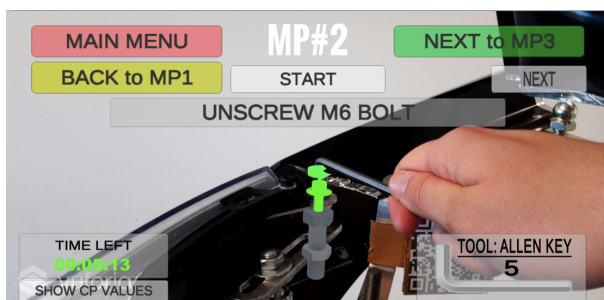


Figura 7.2 – Step n.1 procedura guidata, Mounting point 2.

b. Figura 7.3: Rilascio Controdado M10, componente "e" di Figura 4.1a.



Figura 7.3 – Step n.2 procedura guidata, Mounting Point 2.

c. Figura 7.4: Regolazione registro filettato M10, componente "d" in Figura 4.1a.

Il software in questo caso ha determinato che il registro, presente al supporto di montaggio n.2, dovesse essere ruotato in senso antiorario, e quindi alzato rispetto alla sua posizione di partenza.

L'operatore interviene sulla vite evidenziata, in accordo con la corrispondente freccia animata, fino alla

comparsa del segnale STOP che attesta il raggiungimento della quota.

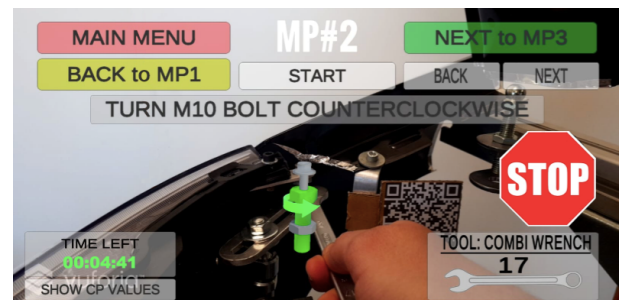


Figura 7.4 – Step n.3 procedura guidata, Mounting Point 2.

d. Figura 7.5: Serraggio Controdado M10, componente "e" Figura 4.1a.

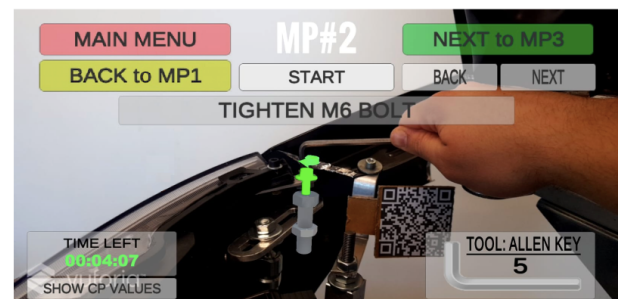


Figura 7.5 – Step n.4 procedura guidata, Mounting Point 2.

e. Figura 7.6: Serraggio Vite M6, componente "a" Figura 4.1a.

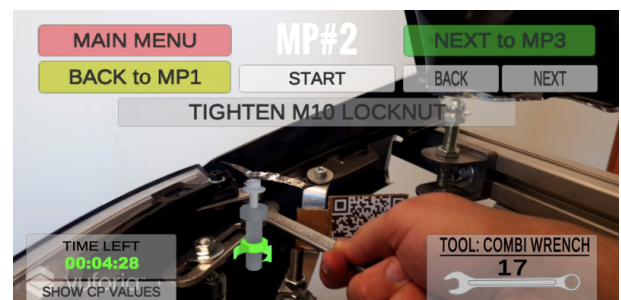


Figura 7.6 – Step n.5 procedura guidata, Mounting Point 2.

8 – Conclusioni

Lo sviluppo ed il testing del sistema hanno dimostrato come le operazioni di assemblaggio e posizionamento dei componenti di carrozzeria possano essere supportate sfruttando la realtà aumentata per la comunicazione efficace ed efficiente di istruzioni generate ad hoc dal software sulla base dei dati disponibili.

Il sistema permette dunque di fornire agli operatori istruzioni puntuali relative alle operazioni da compiere, semplificando e velocizzando il loro lavoro. In questo modo le tempistiche e gli esiti qualitativi delle regolazioni risultano svincolate dalla perizia e dall'esperienza dell'operatore che le conduce. Va infatti ricordato che spesso, per questo tipo di regolazione, l'operatore può essere incerto sulla regolazione da apportare ed è quindi costretto a procedere per tentativi.

Durante questa sperimentazione sono senza dubbio emersi anche i limiti della tecnologia, in particolar modo quelli relativi all'ergonomicità degli attuali sistemi di visione: l'operatore può sentirsi vincolato nei movimenti ed accusare un affaticamento precoce della vista.

A tal proposito va ricordato che probabilmente queste criticità saranno risolte con lo sviluppo, nell'immediato futuro, di dispositivi qualitativamente migliori e dalle performance nettamente superiori.

Prendendo come base il sistema realizzato durante il periodo di tesi sono stati individuati dei possibili sviluppi che potrebbero essere introdotti in occasione di una eventuale prosecuzione della ricerca in questo ambito. Tra questi è di interesse menzionare:

- Necessità di verificare e soprattutto quantificare il vantaggio derivante dall'utilizzo della tecnologia. Sarà quindi necessario predisporre un apposito test tramite il quale le regolazioni supportate dal sistema saranno comparate alle comuni tecniche di intervento ad oggi in uso nella pratica industriale. Il test servirà a mettere in luce le differenze tra le due soluzioni in termini di tempo, qualità del risultato ma, anche e soprattutto, a far emergere le opinioni degli operatori da considerare come importanti feedback di miglioramento.
- Introduzione di elementi di "work gamification": elementi tipici dei giochi/videogiochi di ruolo che sarebbero affiancati alle attività lavorative, sfruttando il mezzo della realtà aumentata, con l'intento di motivare il personale rendendo il lavoro più coinvolgente e meno noioso.
- Integrazione o sostituzione dell'algoritmo attualmente presente nel software, avente la funzione di determinare le regolazioni da apportare al componente di carrozzeria, con una rete neurale. In questo modo sarebbe possibile sfruttare le caratteristiche fondamentali dei sistemi basati sull'intelligenza artificiale tra i quali, in primis, l'apprendimento continuo che permetterebbe di migliorare l'efficacia del sistema.
- Conversione del sistema, nel caso in cui questo sia reso possibile da un upgrade del SDK, per il funzionamento con tecnologia markerless per beneficiare di tutti i vantaggi immaginabili, primo tra i quali, la possibilità di utilizzo del sistema senza la necessità di apporre marker sulle strutture. Questo aspetto renderebbe molto più pratico l'utilizzo del sistema in un contesto industriale.