

Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea Magistrale



VALUTAZIONI ERGONOMICHE E TERMICHE SU ZAINI DA MONTAGNA

Relatore: Prof.ssa Ada Ferri

Co-relatore: Prof.ssa Laura Gastaldi

Nicola Sanna

Dicembre 2021

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la Professoressa Ada Ferri e la professoressa Laura Gastaldi per il supporto ricevuto durante la realizzazione di questo lavoro;

Ringrazio Francesca Dotti per l'aiuto fornitomi durante i test e la completa disponibilità mostrata;

Ringrazio con tutti il cuore la mia famiglia per il sostegno ricevuto lungo tutto questo percorso e spero possano essere sempre fieri di me;

Ringrazio le persone che ho conosciuto lungo questo percorso che mi sono state vicine;

Ringrazio i miei amici che mi sopportano e supportano sia nei momenti belli che in quelli difficili, grazie di cuore a tutti.

Abstract

Questa tesi di laurea si inserisce nell'ambito di un progetto di ricerca in collaborazione con un'azienda italiana di attrezzatura e abbigliamento per la montagna e condotto presso il laboratorio LATT del Politecnico di Torino a Biella, per valutare gli effetti del trasporto di zaini da montagna sul comfort termico ed ergonomico.

Il lavoro consiste nell'elaborazione di immagini termografiche a infrarossi per l'estrapolazione di parametri in grado di valutare la distribuzione delle temperature superficiali negli schienali degli zaini. Il metodo scelto per l'elaborazione delle immagini è basato sull'utilizzo della matrice di Co-Occorrenza da cui vengono estrapolati gli indici di contrasto, omogeneità, entropia e correlazione.

Da un punto di vista procedurale è stato definito un protocollo sperimentale ottimale per garantire la ripetibilità e riproducibilità delle misurazioni e viene presentato un metodo di gestione ed analisi delle immagini termografiche. Ai fini dell'indagine, è stato programmato un algoritmo in ambiente Matlab per la gestione delle immagini e selezione delle regioni di interesse in modo automatico, e per l'elaborazione dei parametri d'interesse.

Infine, una volta ottenuto il set di dati per tutti gli zaini, oltre a valutare la distribuzione della temperatura superficiale lungo gli schienali, si è proceduto a valutare, con metodo statistico, le possibili correlazioni tra gli zaini a seconda dei parametri selezionati.

Indice

1	Introduzione	1
2	Comfort ergonomico di zaini da trekking	3
2.1	Introduzione.....	3
2.2	Biomeccanica	4
2.2.1	<i>Cinematica</i>	4
2.2.1.1	Testa, collo e spalle.....	4
2.2.1.2	Tronco e torace	4
2.2.1.3	Spina dorsale	5
2.2.1.4	Bacino.....	5
2.2.1.5	Arti inferiori.....	5
2.2.2	<i>Parametri spazio-temporali</i>	6
2.3	Metabolismo.....	6
2.4	Attività muscolare.....	6
2.4.1	<i>Collo e spalle</i>	6
2.4.2	<i>Schiena</i>	6
2.4.3	<i>Addome</i>	7
2.4.4	<i>Arti inferiori</i>	7
2.5	Comfort.....	7
2.5.1	<i>Collo e spalle</i>	7
2.5.2	<i>Schiena</i>	8
3	Comfort termico	9
3.1	Introduzione.....	9
3.2	Basi fisiologiche e indici fisiologici di comfort termico	10
3.2.1	<i>Elettroencefalogramma</i>	11
3.2.2	<i>Elettrocardiogramma</i>	12
3.2.3	<i>Temperatura cutanea</i>	12
3.2.4	<i>Risposta galvanica della pelle</i>	12
3.3	Voto medio previsto e Percentuale prevista di insoddisfazione	13

4	Termografia a infrarossi	15
4.1	Introduzione	15
4.2	Principi fisici	15
4.3	Applicazioni per la valutazione di attrezzature e abbigliamento sportivi	17
5	Descrizione dell'attività sperimentale	21
5.1	Scopo	21
5.2	Procedura utilizzata per i test	21
6	Analisi delle immagini termografiche	27
6.1	Introduzione	27
6.2	Gestione e conversione delle immagini	27
6.3	Selezione immagini e definizione area d'interesse	29
6.4	Matrice di co-occorrenza GLCM	31
6.4.1	<i>Parametri ricavati dalla GLCM</i>	35
6.4.1.1	Contrasto	35
6.4.1.2	Omogeneità	35
6.4.1.3	Entropia	36
6.4.1.4	Correlazione	36
6.4.2	<i>Esempi emblematici e considerazioni</i>	38
7	Risultati e conclusioni	43
7.1	Codice per l'estrapolazione dei parametri	43
7.2	Valutazione grafica dei parametri	46
7.3	Analisi statistica	53
7.4	Conclusioni	57
	Indice delle Figure	59
	Indice delle tabelle	60
	Bibliografia	61

1 Introduzione

Lo zaino backpack (BP) rappresenta il metodo di trasporto del carico più diffuso tra le persone. Viene utilizzato sia in ambito lavorativo che sportivo come, per esempio, l'alpinismo e l'escursionismo. All'utilizzo di un BP in maniera non ottimale, sono correlate una diminuzione della stabilità laterale e dell'equilibrio e diversi disturbi biomeccanici. Negli ultimi anni, è stato notato come, rispetto alla condizione senza carico, la presenza dello zaino induca variazioni nella meccanica dell'andatura, nel metabolismo, nell'attività muscolare, nel comfort e nelle prestazioni a seconda del carico, della velocità e della durata dello sforzo. Attualmente sono stati compiuti diversi studi riguardanti il design degli zaini al fine di renderli più ergonomici.

Il lavoro di questa tesi, svolto nell'ambito di un progetto di ricerca in collaborazione con un'azienda italiana di attrezzatura e abbigliamento per la montagna, è stato condotto presso il laboratorio LATT di Città Studi di Biella. L'azienda ha fornito nove zaini di diversi modelli su cui sono stati effettuati i test. I test sono stati eseguiti all'interno di una camera climatica in grado di mantenere stabili i parametri di temperatura e umidità relativa. Per ogni zaino sono state acquisite immagini termografiche dopo 50, 55 e 60 minuti dall'inizio del test. L'interesse del gruppo di lavoro del LATT è stato quello di valutare diversi tipi di parametri relativi al comfort termico ed ergonomico, tra cui la distribuzione della temperatura superficiale sullo schienale degli zaini nei diversi intervalli di campionamento. Il mio contributo all'attività sperimentale è stato quello di partecipare come tester ai vari test eseguiti sugli zaini e di realizzare un algoritmo, in ambiente Matlab, in grado di processare le varie immagini termografiche in maniera autonoma. Se inizialmente le immagini termografiche venivano processate una alla volta da un operatore specializzato, a seguito del lavoro è stato definito un protocollo automatizzato in grado di analizzare contemporaneamente più immagini, velocizzando i tempi di elaborazione e le fasi di acquisizione dei parametri d'interesse.

Il metodo che ho scelto per la valutazione della distribuzione di temperatura degli schienali è basato sull'utilizzo della matrice di Co-Occorrenza. In particolare, da questa matrice sono stati estrapolati i parametri di Contrasto, Omogeneità, Entropia e Correlazione. Al termine delle operazioni di acquisizione, il mio obiettivo è stato quello di valutare il loro andamento nei diversi intervalli di campionamento e verificare eventuali corrispondenze tra gli zaini testati.

L'elaborato consiste in una prima parte introduttiva in cui viene riportata una revisione della letteratura sul sistema di trasporto del carico tramite uno zaino backpack. Una sezione è dedicata al comfort termico. Viene descritto il fenomeno e gli indici che ne permettono la valutazione. Una parte riporta i principi fisici della termografia a infrarossi e le sue applicazioni per la valutazione di attrezzature e abbigliamento sportivi. Il corpo centrale riporta la procedura utilizzata per l'attività sperimentale svolta, specificando le motivazioni che hanno portato allo svolgimento di quest'attività e il contributo che ho dato. Segue l'elaborazione delle immagini termografiche che rappresenta una delle parti più importanti del lavoro svolto. I dati caratteristici raccolti dall'analisi condotta sugli schienali degli zaini sono ampiamente

supportati da grafici, tabelle e valori numerici. Il lavoro si conclude con l'indagine statistica che permette di validare i dati rilevati e di mettere in evidenza le possibili correlazioni tra gli zaini.

2 Comfort ergonomico di zaini da trekking

2.1 Introduzione

Tra i sistemi di trasporto del carico, lo zaino backpack (BP) rappresenta certamente uno dei più diffusi nel mondo, con decine di milioni di persone che lo usano. Tra gli adulti, il BP rappresenta un accessorio molto utilizzato sia nella vita lavorativa che in quella sportiva. Per quanto riguarda quest'ultimo utilizzo, in particolare, un BP comodo, funzionale e ben calzato è essenziale sia in termini di performance che di sicurezza in diverse discipline come l'escursionismo, l'alpinismo, il jogging, ecc. [1]. In ambito scolastico, inoltre, sempre di più si sentono lamentele da parte degli adolescenti che soffrono di mal di schiena. Questo dolore è associato, la maggior parte delle volte, ad un affaticamento muscolare causato dal trasporto di uno zaino [2]. L'uso improprio dello zaino oltre a causare problemi alla schiena, può portare ad una diminuzione della stabilità laterale e dell'equilibrio [3]. Inoltre, può causare diversi disturbi biomeccanici, come la postura della testa in avanti, fisiologici e neuromuscolari che possono andare ad alterare in maniera negativa le prestazioni fisiche [4].

Complessivamente, rispetto alla condizione di scarico, l'uso di uno zaino BP induce modifiche nella meccanica dell'andatura, nel metabolismo, nell'attività muscolare, nel comfort e nelle prestazioni a seconda del carico, della velocità e della durata dello sforzo [5] [6].

Dahl et al. [7] si sono concentrati sui parametri che possono portare a degli scompensi per quanto riguarda l'ergonomia degli zaini. Devroey et al. [8] hanno studiato il peso degli zaini e come esso può influenzare la postura durante il proprio trasporto. Per carichi fino al 10% BW (Body Weight) non si sono osservate variazioni rilevanti, mentre con carichi superiori (15-20% BW) sono state riportate compensazioni posturali evidenti.

Inoltre, sulla postura e sull'attività muscolare, hanno influenza il tipo di zaino e il metodo di trasporto. Si consiglia di usare uno zaino con entrambi gli spallacci indossati in quanto garantisce prestazioni simili a quelle senza l'utilizzo dello zaino [2].

Abdelraouf et al. [4] hanno indagato sulla lunghezza degli spallacci, evidenziando un uso degli spallacci corti più funzionale per evitare una postura della testa in avanti.

Col tempo il design degli zaini si è evoluto. Come parte di questo sviluppo, caratteristiche come la cintura lombare (HB) sono state aggiunte nel tentativo di rendere gli zaini più sicuri e confortevoli, di migliorare la postura e di diminuire i costi energetici. Con l'utilizzo di una cintura lombare si riesce a distribuire il carico più uniformemente lungo il corpo, portando ad una diminuzione della forza esercitata sulle spalle e sul tronco. Un altro fattore da tenere sotto controllo è il posizionamento del carico lungo l'asse verticale dello zaino in quanto concorre a un miglioramento della stabilità posturale statica e dinamica [9].

L'insieme di tutti questi fattori concorre nell'ergonomia dello zaino.

2.2 Biomeccanica

2.2.1 Cinematica

2.2.1.1 Testa, collo e spalle

Sono stati riportati risultati discordanti per quanto riguarda la testa e il collo. Dahl e Caron [7] [10] hanno osservato un'iperestensione del capo, con conseguente postura in avanti della testa, con carichi fino al 15-40% BW rispetto alla condizione di senza carico. Questa può provocare dolore a spalle e collo, oltre ad uno stress eccessivo sulla colonna vertebrale. Viceversa, Devroey et al. [8] non hanno evidenziato cambiamenti negli angoli della testa e del collo dovuti all'aumento del carico.

Una postura in avanti della testa e del collo, indicata da una diminuzione dell'angolo cranio vertebrale, è stata associata all'uso di uno zaino con cinghie lunghe piuttosto che con l'uso di cinghie corte, situazione che si avvicina maggiormente alla condizione senza carico [4].

Per quanto riguarda le variazioni di movimento della spalla durante la camminata in pendenza al variare della velocità e del carico, Rosa et al. [11] hanno osservato che con un carico del 25% BW vi è una diminuzione significativa del movimento della spalla sul piano trasversale.

Un fattore molto importante, nell'inclinazione del busto, è il posizionamento del carico, il quale dovrebbe essere posizionato il più vicino possibile al corpo per non indurre differenze significative nell'angolo cranio vertebrale, rispetto alla condizione senza carico, e per non affaticare eccessivamente i muscoli delle spalle [4] [12].

2.2.1.2 Tronco e torace

All'aumentare del carico fino al 40% BW, aumenta l'inclinazione in avanti del tronco, sia durante la camminata in piano che in pendenza. Questo cambiamento è stato scoperto essere un adattamento per portare il centro di massa del corpo e dello zaino più in avanti in modo da mantenere l'equilibrio [7] [8] [10] [11].

Una diminuzione significativa è stata osservata nella rotazione del tronco e del torace nel piano trasversale per aumenti di carico del 10-40% BW rispetto alla condizione non caricata. Lafiandra e Rosa [5] [11] hanno scoperto un'interazione tra la velocità di camminata e il carico, la quale porta a differenze nella cinematica di tronco e torace all'aumentare della velocità.

Per quanto riguarda l'influenza del design dello zaino, è stato riportato che l'uso della cintura lombare porta ad un aumento dell'ampiezza di rotazione del torace rispetto alla condizione senza cintura, indicando la cintura come benefica [13]. Inoltre, utilizzare un BP con le cinghie non flessibili permette di non avere variazioni nell'inclinazione del tronco in avanti durante la marcia, variazione che si verifica con l'uso di cinghie flessibili [17].

2.2.1.3 Spina dorsale

Si è notata una diminuzione significativa della lordosi lombare e della cifosi toracica superiore indotte dal carico tra il 5-20% di BW rispetto alla condizione senza carico [14]. Inoltre, è stato riportato che indossare un BP, caricato 10% BW con supporto lombare, riduce significativamente l'effetto del carico sulla regione lombare rispetto a un BP senza supporto, cioè mostrando differenze non significative rispetto alla condizione senza carico [15].

2.2.1.4 Bacino

Sono stati osservati cambiamenti significativi nell'antiversione del bacino con carichi superiori al 10% BW [8]. È stata osservato un aumento della rotazione del bacino con l'utilizzo di un BP con cintura lombare rispetto alla condizione senza cintura, indicando la cintura come benefica in quanto permette anche una migliore stabilità, non troppo diversa da quella della camminata senza carico [13].

2.2.1.5 Arti inferiori

Con l'aumento del carico si è osservato un aumento del range di movimento dell'anca nel piano sagittale [8]. Questo meccanismo si verifica per compensare una diminuzione della rotazione pelvica e per far sì che la velocità di camminata rimanga uguale a quella senza carico [5].

Con carichi del 20-40% BW, alcuni studi hanno evidenziato un aumento significativo della flessione del ginocchio durante la camminata all'impatto del piede, la quale consentirebbe un maggiore assorbimento del carico e di conseguenza un minore stress articolare [6] [7].

Portare carichi eccessivi (40% BW) può alterare la gamma di movimento di dorsi-plantiflessione della caviglia, in particolare, durante la camminata in pendenza [16]. Infine, sono stati evidenziati aumenti significativi della plantiflessione all'aumento del carico anche nella camminata in piano [6].

2.2.2 Parametri spazio-temporali

Grenier et al. [20] hanno evidenziato un aumento della lunghezza del passo per carichi crescenti fino al 46% BW, mentre Majumdar e Tzu-wei [19] [21] non hanno trovato differenze significative con carichi tra 0-40% BW. All'aumentare del carico, fino al 20% BW non sono stati rilevati cambiamenti significativi sulla velocità di camminata. Lo stesso è stato evidenziato per carichi fino al 20% BW per quanto riguarda la cadenza della camminata [18] [19].

Per quanto riguarda il tempo di stance è stato riportato un aumento significativo per carichi tra 0-40% BW per la camminata in piano [20], mentre per la camminata inclinata si sono verificati i risultati opposti [16].

2.3 Metabolismo

Il costo metabolico è uno dei parametri maggiormente considerati quando si vuole indagare sull'energia, molti studi si sono concentrati su quest'aspetto per capire la correlazione tra il trasporto di carico e la domanda di ossigeno (VO_2).

Per quanto riguarda la corsa, anche il solo trasporto di un carico molto leggero (5% BW) ha effetti significativi sulla frequenza cardiaca, VO_2 e costo energetico [22] rispetto alla condizione senza carico.

2.4 Attività muscolare

2.4.1 Collo e spalle

Rispetto alla condizione non caricata si sono osservate variazioni minime dei muscoli cervicali per carichi del 10% BW con il trasporto di un BP tradizionale [8]. Inoltre, Krutzenstein et al. [23] hanno evidenziato una relazione tra l'altezza di attacco delle bretelle dello zaino e l'attività muscolare di trapezio e deltoide, trovando come benefica una posizione dell'attacco 2 cm sopra l'orizzontale della spalla, in questa condizione vi è un alleggerimento dell'attività muscolare.

2.4.2 Schiena

All'aumentare del carico, i risultati dell'elettromiografia mostrano un'attività degli estensori della schiena significativamente diminuita per carichi del 5-15% BW, rispetto alla condizione senza carico [8].

Per quanto riguarda il grande dorsale, non sono state evidenziate differenze significative durante il trasporto di un BP a 2 cinghie con un carico del 10% BW rispetto alla condizione senza carico [2].

2.4.3 *Addome*

Sono stati osservati aumenti dell'attività del retto addominale all'aumentare del carico fino al 10-20% BW rispetto alla condizione senza carico [8] [24]. Questo aumento è giustificato dal fatto che il trasporto dello zaino causa uno spostamento del centro di gravità all'indietro che deve essere controbilanciato dall'estensione del retto addominale.

2.4.4 *Arti inferiori*

Simpson e Lidner [6] [25] hanno trovato differenze significative per carichi fino al 40% BW in tibiale anteriore, gastrocnemio mediale e laterale, bicipite femorale, vasto laterale e retto femorale, mentre non sono stati riportati cambiamenti significativi dell'attività del vasto mediale e del bicipite femorale [24].

Si è scoperto che la durata dell'attività fisica ha un effetto significativo sull'attività muscolare degli arti inferiori, essa infatti diminuisce all'aumentare della distanza [6].

2.5 **Comfort**

2.5.1 *Collo e spalle*

Dagli studi sugli studenti universitari, è emerso che la distribuzione del carico ha un impatto notevole sul comfort percepito di spalle e collo, evidenziando differenze significative tra la distribuzione tradizionale e quella verticale per carichi fino al 10% BW [3]. È stato riportato come più confortevole quella verticale.

Anche la lunghezza delle cinghie ha un forte impatto sul comfort delle spalle, in particolare, l'utilizzo di un BP con cinghie lunghe e caricato con il 15% BW, provoca un maggiore disagio rispetto all'utilizzo dello stesso zaino ma con degli spallacci più corti [4]. L'utilizzo di un BP dotato di cintura lombare, la quale permette di scaricare una percentuale di carico dalle spalle, ha portato a un valore nettamente inferiore sulla scala di percezione dello sforzo (RPE) [9].

2.5.2 *Schiena*

Anche per la schiena è stato riportato un valore più basso di RPE quando si indossa un BP dotato di cintura lombare.

Per quanto riguarda il comfort percepito nella parte bassa della schiena, è emerso da diversi studi una differenza significativa tra la distribuzione del carico tradizionale e quella più verticale, con quest'ultima indicata come quella più confortevole quando si trasporta un carico del 10% BW [3].

3 Comfort termico

3.1 Introduzione

Il microclima è l'insieme dei parametri fisici ambientali che caratterizzano l'aria degli ambienti confinati; una condizione climatica confortevole provoca nella maggior parte delle persone una sensazione di appagamento per l'ambiente termico, detta benessere termo-igrometrico o comfort termico.

Il comfort termico viene definito dall'ASHRAE (ente internazionale che si occupa di normative sulle condizioni termiche ambientali degli occupanti) come: "condizione in cui un individuo esprime soddisfazione nei confronti dell'ambiente che lo circonda" [26]. Questa definizione evidenzia il fatto che il comfort termico ambientale viene percepito dall'utente in modo diverso; esso dipende da molteplici fattori: fisici, culturali, psicologici, organici, ecc..[27].

Le condizioni microclimatiche rappresentano un importante fattore ergonomico da tenere sotto controllo. È stato osservato che una delle principali cause che porta le persone a manifestare una sensazione di disagio termico sono le condizioni climatiche all'interno dei locali in cui svolgono le proprie attività [28].

Il complesso delle variabili microclimatiche influenza lo scambio termico dell'uomo e condiziona la percezione dell'ambiente termico da parte degli occupanti.

I principali parametri fisici che concorrono nell'influenzare il comfort termico di un individuo sono: la temperatura dell'aria (T_a), la temperatura media radiante (T_r), la velocità dell'aria (V_a) e l'umidità relativa (U_r) [29]. I primi due parametri sono quelli che influenzano maggiormente la sensazione di calore, in quanto, la radiazione di calore che cade sulla cute fa in modo che si attivino gli organi sensori. La velocità dell'aria favorisce la dissipazione di calore, sfruttando la superficie dell'epidermide. Infine, l'umidità relativa condiziona l'entità della sudorazione andando ad alterare il tasso di evaporazione dell'acqua a livello cutaneo.

Il comfort termico è influenzato anche da due parametri oggettivi: il dispendio metabolico (M) e l'isolamento termico del vestiario (CLO). La stima di queste due grandezze è descritta in due norme: la ISO 8896:2004 [30] e la 9920:2007 [31], rispettivamente.

L'insieme di questi sei parametri caratterizza l'indice PMV (Voto Medio Previsto), che rappresenta il metodo più utilizzato per la valutazione del comfort termico degli ambienti. Dal PMV è derivato un secondo indice, denominato PPD (percentuale prevista di insoddisfazione) che stima percentualmente il numero di individui che potrebbero essere "insoddisfatti" in relazione a determinate condizioni microclimatiche.

3.2 Basi fisiologiche e indici fisiologici di comfort termico

Il comfort termico è determinato dalla compartecipazione di due sistemi di termoregolazione: il sistema passivo, modellato considerando il corpo umano e i fenomeni di trasferimento di calore e umidità che avvengono tra il corpo e l'ambiente esterno, e il sistema attivo che si occupa di svolgere tutte le funzioni di controllo sul sistema passivo e sulla percezione del comfort termico.

Il sistema controllato è condizionato da squilibri termici esterni, legati alla temperatura dell'ambiente che ci circonda, ed interni come la generazione di calore metabolico [32].

Il sistema di termoregolazione serve per evitare che la perturbazione termica si diffonda, sempre più in profondità, all'interno del corpo. Questo compito viene svolto dall'ipotalamo, una parte del sistema nervoso centrale (SNC), che svolge delle azioni di controllo come la generazione di calore tramite i brividi o la sottrazione di calore tramite l'evaporazione del sudore [32].

Essendo il comfort termico condizionato continuamente e quantitativamente dai cambiamenti nel tempo, la sua valutazione richiede l'utilizzo di parametri che stimino i livelli di comfort termico degli individui in modo continuo e quantitativo, come i parametri fisiologici [28].

I dati estrapolati dai segnali derivati da elettroencefalogramma (EEG), elettrocardiogramma (ECG), frequenza cardiaca e temperatura della pelle sono stati individuati come ottimi indicatori per la valutazione del benessere termico [33].

I recettori termici, localizzati sulla cute, propagano la stimolazione termica al sistema nervoso centrale, il quale condiziona la percezione termica. Questa variazione nella sensazione termica influenza il sistema nervoso autonomo (SNA), a questo punto la risposta è condotta attraverso gli organi locomotori. Prendendo in considerazione questo processo, possiamo definire l'EEG come indicatore della risposta del sistema nervoso centrale, l'ECG come indicatore della reazione del sistema nervoso autonomo e la temperatura della pelle (ST) come indicatore del trasferimento di calore tra l'ambiente esterno e il corpo umano [28].

Gagge et al. [34] hanno osservato come i brividi e la sudorazione siano dei meccanismi, indotti dal corpo, per bilanciare le temperature fredde e l'effetto di raffreddamento. Yao et al. [35] hanno evidenziato come al variare della temperatura si vadano ad alterare alcuni parametri fisiologici come la temperatura della pelle, il rapporto tra bassa frequenza (LF) e alta frequenza (HF) dell'ECG e le diverse bande di frequenza dell'EEG.

Molti studi affermano che c'è un legame di dipendenza reciproca tra fattori oggettivi e soggettivi per la valutazione del comfort termico, per questo motivo le misurazioni dei parametri fisiologici giocano un ruolo fondamentale per questo scopo.

Sim et al. [36] hanno scoperto un forte legame tra il tasso di sudorazione e la temperatura, evidenziando una variazione della quantità di sudore al variare dello stato termico dell'individuo. A tal proposito è stato introdotto un ulteriore parametro fisiologico, il Galvanic

Skin Response (GSR), ovvero, una misura delle variazioni continue nelle caratteristiche elettriche della pelle a seguito della variazione della sudorazione corporea.

3.2.1 *Elettroencefalogramma*

Le ricerche degli ultimi anni si sono occupate di analizzare in che modo il segnale EEG potesse essere utile nel fornire informazioni sul comfort termico e sulla sensibilità termica. È stato dimostrato che il segnale EEG è legato ai processi sensoriali e cognitivi, che sono condizionati da stimoli esterni, come il mutare della temperatura ambiente. Pertanto, possiamo affermare che le variazioni dei segnali EEG sono legate ai cambiamenti dello stato termico esterno, evidenziando l'importanza dei dati EEG per la misurazione del comfort termico [28].

Un ambiente non termicamente neutro può indurre uno stato di stress, per questo motivo, l'analisi della power spectral density (PSD) delle varie bande del segnale EEG è generalmente utilizzata per stabilire se un individuo si sente termicamente a suo agio, stressato o rilassato.

Da studi condotti da Young et al. [37] sull'analisi della PSD del segnale EEG, si è osservato che le varie bande del segnale variano a seconda delle condizioni termiche a cui è sottoposto un individuo. È stato evidenziato un aumento della potenza relativa alla banda theta (θ) e una corrispondente diminuzione della potenza relativa alle bande alfa e beta (α e β) con l'avvicinarsi a una condizione di comfort termico.

Le tecniche di apprendimento autonomo sono state valutate come uno dei metodi più efficaci per l'analisi EEG. Questi metodi sono stati ampiamente utilizzati per identificare i vari stati di comfort termico nelle persone [38].

Shan et al. [38] hanno utilizzato questa tecnica per indagare l'interazione degli occupanti con l'edificio per diverse condizioni termiche. Dai risultati si è scoperto che le risposte date dai partecipanti allo studio, raccolte tramite questionari, erano correlate all'asimmetria frontale dell'EEG.

Wu et al. [39] hanno analizzato come variassero le diverse bande dell'EEG per temperature calde, osservando un aumento delle onde delta e una diminuzione delle onde beta. Questo potrebbe essere giustificato dal fatto che una sensazione di calore può indurre uno stato mentale di sonnolenza (aumento banda delta) e conseguentemente un abbassamento del livello di attenzione (diminuzione banda beta). Dai risultati ottenuti, si è riuscito a sviluppare un classificatore LDA (Machine Learning Method) che, a partire dall'analisi della PSD dell'elettroencefalogramma, permettesse di identificare il comfort termico dell'individuo con una precisione del 90%.

3.2.2 *Elettrocardiogramma*

La variabilità della frequenza cardiaca (HRV), monitorata attraverso l'elettrocardiogramma, tramite sensori indossabili, è un parametro fisiologico ampiamente utilizzato per la valutazione del comfort termico [40].

Yao et al. [35] si sono soffermati sul legame tra comfort termico e HRV andando ad osservare come il rapporto basse e alte frequenze dell'ECG fosse condizionato dalle variazioni della temperatura ambiente e dalle sensazioni termiche avvertite dalle persone.

Mansi et al. [28] hanno indagato su quest'aspetto, dimostrando che il rapporto LF/HF può essere utilizzato come indicatore per la misurazione del comfort termico. I risultati di queste ricerche hanno evidenziato il fatto che per valori LF/HF vicini a 1 si è in una condizione termica confortevole, mentre valori più alti o più bassi si manifestano in condizioni termiche di disagio (ambienti caldi e freddi).

3.2.3 *Temperatura cutanea*

La temperatura cutanea svolge una funzione particolarmente importante per il controllo del sistema di termoregolazione del corpo umano. Oggigiorno per la misurazione della temperatura corporea (ST) vengono utilizzati termocoppie o termometri a resistenza, posizionati sulla superficie del corpo, e termometri a infrarossi [28].

Poiché la pelle fa da tramite tra il corpo umano e l'ambiente esterno, la ST viene utilizzata come indice per il valutare della percezione termica di un individuo.

Il sistema termoregolatore autonomo sfrutta i vasi sanguigni periferici per mantenere costante la temperatura del corpo umano. A seconda che ci si trovi in un ambiente caldo o freddo, si verifica il meccanismo di vasodilatazione o vasocostrizione che porta a una variazione del flusso sanguigno e di conseguenza a una minore o maggiore dispersione del calore. È stato osservato che questo cambiamento nella quantità di flusso porta a una variazione dello stato della ST [41].

Mansi et al. [28] hanno scoperto che diverse parti del corpo sono maggiormente sensibili alle variazioni termiche in condizioni di freddo rispetto ad altre. Diversi studi hanno rilevato che la ST del polso è quella che permette una migliore stima della sensazione termica personale.

3.2.4 *Risposta galvanica della pelle*

Molti studi sostengono che c'è una forte relazione tra lo stato termico e il tasso di sudorazione. Uno dei metodi maggiormente diffusi per la misurazione del sudore è lo sweat rate (SR), il quale misura il tasso di evaporazione dell'umidità generata dal processo di sudorazione [28]. Sim et al. [36] hanno sviluppato un sensore di tasso di sudorazione ad orologio, in grado di monitorare il comfort termico umano; dai risultati è emerso che l'SR varia al mutare delle condizioni termiche.

3.3 Voto medio previsto e Percentuale prevista di insoddisfazione

Gli indici PMV e PPD vengono definiti e descritti nella norma ISO 7730:2005 [42]

Il voto medio previsto è un indice della sensazione di calore termico, valutato su un ampio gruppo di persone. Per la valutazione viene utilizzata una scala psicofisica a sette valori, l'intervallo va da -3 a +3, dove lo zero rappresenta lo stato di benessere termico ed i valori estremi la sensazione di molto freddo (-3) e molto caldo (+3), come mostrato in Fig.3.1 [43].

+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Abbastanza caldo
0	Accettabilità termica
-1	Abbastanza freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Figura 3.1: Rappresentazione grafica del PMV

Una volta che il PMV è noto, il PPD viene calcolato per determinare la percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente (ovvero persone che hanno votato un valore di PMV il cui modulo sia pari o superiore a 2) [43].

La Fig. 3.2 rappresenta graficamente la relazione ricavata sperimentalmente tra gli indici PMV e PPD. A $PMV=0$ corrisponde un PPD del 5% (tasso di insoddisfazione), questo perché da studi condotti da Cako et al. [44] è emerso che, a causa delle differenze fondamentali tra le persone, è impossibile creare un'unica condizione ambientale adatta a tutti.

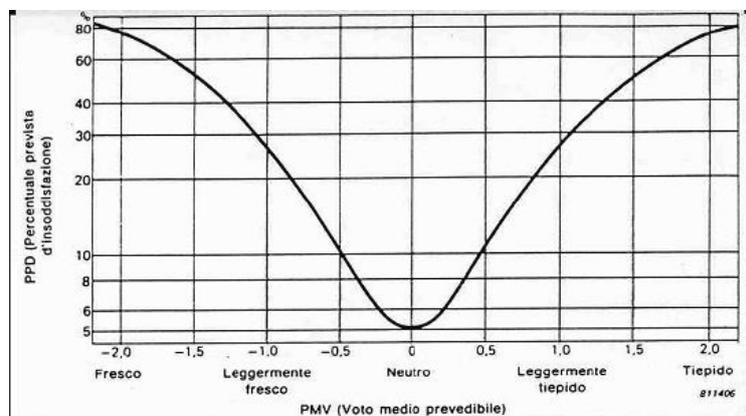


Figura 3.2: Relazione PMV-PPD

La **norma ISO 7730:2005** suggerisce dei valori da non superare di PMV e PPD all'interno di un ambiente termico in modo da non aumentare l'insoddisfazione delle persone. Il valore di PMV deve essere compreso all'interno dell'intervallo ± 0.5 con un $PPD \leq 10\%$ [42]; questo è ancora uno stato che può essere classificato come uno stato di benessere termico.

4 Termografia a infrarossi

4.1 Introduzione

La termografia a infrarossi è stata utilizzata per la prima volta negli anni 60', ma solo recentemente è diventata più popolare. Questo grazie ai progressi tecnologici, sia a livello di hardware che di software utilizzati nei diversi campi di applicazione delle valutazioni delle immagini termiche [45]. Tuttavia, ancora oggi, la termografia richiede degli accorgimenti al fine di ottenere un risultato finale valido.

Si tratta di una tecnologia nata per scopi militari e poi successivamente utilizzata in molti altri campi come l'industria, l'ingegneria e lo sport. In quest'ultimo ambito, in particolare nello studio del comfort termo-fisiologico, ha riscontrato un notevole interesse, dato che si tratta di una tecnica completamente non invasiva in quanto viene effettuata a distanza dall'individuo (o oggetto) ed inoltre non interferisce con la termoregolazione umana [46]. Negli ultimi anni, è stato riscontrato un notevole interesse nell'uso della termografia a infrarossi per valutare abbigliamento e attrezzature sportive con lo scopo di migliorare i vari progetti, testare nuovi materiali e monitorare l'interazione tra i parametri fisiologici e le attrezzature stesse.

Come tutte le tecniche, possiede dei vantaggi e dei limiti che dipendono dalla natura dell'applicazione e dallo scopo della misurazione. Essendo una tecnica in continua evoluzione e fortemente dipendente dalla tecnologia, presenta il vantaggio di poter utilizzare la miglior attrezzatura disponibile sul mercato garantendo una maggiore risoluzione, una migliore precisione e riproducibilità e una diminuzione degli errori. Allo stesso tempo, questo comporta un aumento dei costi dell'attrezzatura, soprattutto se si vuole garantire un'alta risoluzione, e il fatto che si rischi di usare degli strumenti obsoleti a seconda della loro applicazione.

La tecnica permette di eseguire le misurazioni in diverse condizioni e possibilità. A tale proposito, per ottenere delle misurazioni valide, oltre a un'ottima preparazione del personale addetto alla misurazione, è necessario controllare alcune caratteristiche ambientali come, ad esempio, temperatura e umidità, che possono limitare i dati termografici registrati [47].

4.2 Principi fisici

La termografia a infrarossi è una tecnica di imaging, non invasiva, che permette di stimare, attraverso i dati estrapolati dall'immagine, la temperatura superficiale del corpo e degli oggetti [47]. La stima della temperatura superficiale si basa sulla radiazione infrarossa, a tale proposito è importante definire questa e lo spettro elettromagnetico. La radiazione elettromagnetica rappresenta una forma di trasferimento di energia che avviene senza trasporto di massa, viene solitamente quantificata dalla frequenza e dalla lunghezza della sua onda. Al variare di queste due grandezze, la radiazione elettromagnetica presenta caratteristiche diverse. Lo spettro elettromagnetico è una rappresentazione di tutte le possibili frequenze della radiazione elettromagnetica. L'intero spettro è composto da diverse

gamme di frequenza, come mostrato in Fig. 4.1, che vanno da bassa frequenza ed elevata lunghezza d'onda (gamma che va dal visibile alle onde radio, poco dannose) ad alta frequenza e corta lunghezza d'onda (gamma che va dall'ultravioletto ai raggi gamma, possono essere dannose per gli esseri viventi).

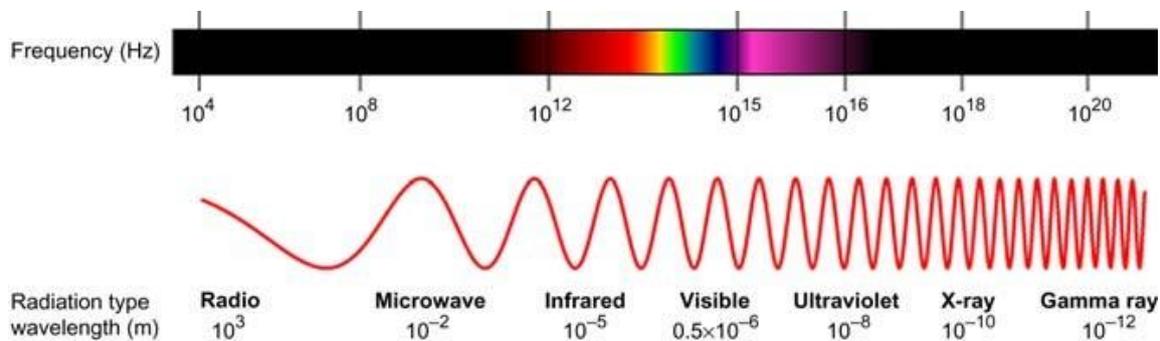


Figura 4.1: Spettro elettromagnetico [47]

Noi ci concentriamo sulla gamma di radiazione infrarosse che ha una lunghezza d'onda che va da 750 nm a 1 mm e quindi non sono percettibili all'occhio umano. Questa banda si divide in tre sottogruppi: vicino (0.75 - 1.5 μm), medio (1.5 - 5.6 μm) e lontano infrarosso (5.6 μm - 1 mm). A seconda della lunghezza d'onda, nel range dell'infrarosso, a cui ci troviamo dobbiamo utilizzare una telecamera a infrarossi diversa in quanto i rilevatori sono adatti per una gamma specifica.

La radiazione infrarossa è solitamente conosciuta come radiazione termica, poiché il nostro corpo la percepisce sotto forma di calore. Questo concetto è fortemente legato con la temperatura, infatti, ogni oggetto con una temperatura superiore allo zero assoluto (-273°C circa) emette spontaneamente radiazione in questa banda che dipende dalla sua temperatura. Maggiore è la temperatura di un corpo (o oggetto) e maggiore è l'energia cinetica delle molecole, con conseguente maggiore emissione di radiazione infrarossa.

Per comprendere al meglio il calcolo della temperatura superficiale dalla radiazione infrarossa di un corpo è importante conoscere le leggi fisiche che spiegano questa relazione. Le principali leggi fisiche che spiegano tale relazione sono: la legge dello spostamento di Wien (consente di individuare per quale lunghezza d'onda λ_{max} è massima l'emissione radiativa di un corpo nero di massa generica a una certa temperatura T), la legge di Planck (mette in relazione l'intensità della radiazione spettrale di un corpo nero con la sua frequenza e temperatura) e la legge di Stefan-Boltzmann. In questo paragrafo ci soffermeremo maggiormente sulla legge di Stefan-Boltzmann, poiché è considerata la legge fondamentale che governa la termografia a infrarossi e inoltre, è quella impiegata nel software delle termocamere a infrarossi per calcolare la temperatura. Secondo questa legge un corpo nero emette una quantità di energia proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta, considerando una costante e l'emissività del corpo (Eq.4.1):

$$E = \sigma \times \varepsilon \times T^4 \quad 4.1$$

Dove E è l'emittanza termica, σ è la costante di Stefan-Boltzmann, ϵ è l'emissività e T è la temperatura assoluta.

Questa legge ci permette di comprendere come piccoli cambiamenti nella temperatura si traducano in grandi cambiamenti nella potenza emissiva, perché la temperatura è espressa come quarta potenza [45].

Per sapere se è possibile misurare la temperatura di un corpo con la termografia a infrarossi è necessario conoscere le sue caratteristiche radiative. Gli attributi che spiegano le caratteristiche radiative di un corpo sono l'assorbanza, la riflettività, la trasmittività e l'emissività [45]. L'assorbanza è la capacità di assorbire la radiazione infrarossa. La riflettività è la capacità di riflettere la radiazione infrarossa. La trasmittività è la capacità di lasciar passare la radiazione. Infine, l'emissività è la capacità di emettere la propria radiazione infrarossa. La conoscenza del valore di emissività del materiale testato è fondamentale per ottenere valori di temperatura corretti.

Per poter calcolare, nella maniera più precisa possibile, la temperatura superficiale di un corpo, è essenziale che il corpo presenti una trasmittività pari a zero e un'emissività il più vicino possibile a 1. Inoltre, corpi che presentano alti valori di riflettività comportano elevati errori nel calcolo della temperatura in quanto la maggior parte della radiazione in uscita proviene dall'ambiente. I materiali tessili, in generale, hanno emissività di circa 0,98.

4.3 Applicazioni per la valutazione di attrezzature e abbigliamento sportivi

In questo paragrafo vengono riportati alcuni esempi di possibili applicazioni della termografia a infrarossi nella valutazione delle attrezzature sportive.

Esempio 1 Il primo esempio riguarda l'uso della termografia a infrarossi per la valutazione dello stato degli pneumatici di una macchina da corsa durante una gara. Con questa tecnica è possibile monitorare la condizione e l'evoluzione delle gomme durante la gara e di conseguenza, agevolare il compito decisionale sul momento in cui effettuare il cambio delle gomme. Solitamente le misurazioni vengono fatte prima della gara in modo da poter apportare delle modifiche agli pneumatici, come, ad esempio, l'uso di materiali differenti. La temperatura delle gomme, rilevata tramite termografia, oltre ad essere correlata all'usura e anche correlata alla pressione degli pneumatici. A tale proposito è possibile effettuare della misurazione real-time durante le prove o la gara (Fig. 4.2).

Esempio 2 Si consideri adesso l'uso della termografia a infrarossi per il rilevamento del doping tecnologico nel ciclismo. Alcuni anni fa in Francia si è ipotizzato che alcuni atleti usassero dei motori, inseriti all'interno delle biciclette e quindi non visibili ad occhio nudo, per generare maggiore potenza in determinate fasi della corsa. In questo caso l'uso della termografia a infrarossi è servito per identificare le zone calde presenti nelle biciclette che potrebbero essere associate alla dissipazione di calore generata dal funzionamento del motore all'interno del telaio (Fig. 4.3).

Esempio 3 Come ultimo esempio viene riportato l'uso della termografia a infrarossi per la valutazione della distribuzione di temperatura negli indumenti sportivi. Gli indumenti sportivi sono l'interfaccia tra la pelle e l'ambiente. Presentano delle caratteristiche, variabili a seconda dello sport e dell'ambiente, utili al miglioramento della termoregolazione dello sportivo, al l'aumento delle prestazioni e una riduzione del rischio di problemi medici.

Per questo tipo di misurazioni, la termografia permette di misurare la temperatura del tessuto e la sua interazione con l'atleta e l'ambiente durante l'esercizio. È anche possibile usare una combinazione di più strumenti come la termografia a infrarossi accompagnata dall'utilizzo di sensori termici a contatto. Zhang et al, ad esempio, hanno combinato la termografia a infrarossi delle temperature superficiali degli indumenti con i dati di scansione 3D come mostrato in Fig. 4.4 [48].



Figura 3.2 Immagini termografiche degli pneumatici di un'auto da corsa [47]



Figura 4.3: Immagine termografica del telaio di una bicicletta [47]

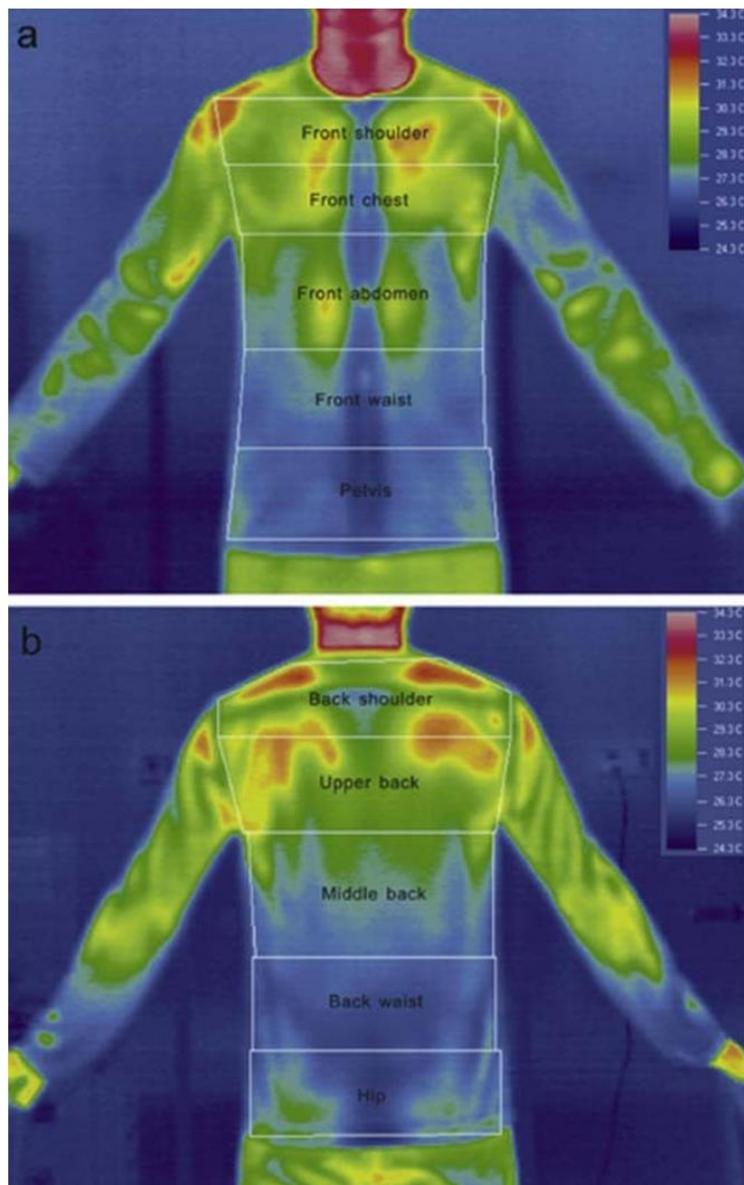


Figura 4.4: Immagine termografica della distribuzione di temperatura del tessuto (fronte e retro) [48].

5 Descrizione dell'attività sperimentale

5.1 Scopo

Il lavoro svolto ha avuto l'obiettivo di valutare come l'utilizzo di uno zaino da montagna, durante lo svolgimento di un'attività fisica, possa indurre delle modifiche nel comfort termico ed ergonomico percepito da un individuo.

Lo scopo è quello di indagare tra i vari zaini, provenienti dall'azienda interessata allo studio e da altre due aziende concorrenti, quale fornisca i migliori risultati per quanto riguarda i seguenti parametri:

1. Comfort ergonomico
2. Comfort termico

L'attività da me svolta all'interno della campagna sperimentale si basa principalmente sull'aver partecipato come tester ai vari test sugli zaini e sulla realizzazione di un algoritmo per l'analisi e l'elaborazione delle immagini termografiche.

5.2 Procedura utilizzata per i test

Tutte le prove sono state effettuate presso il laboratorio LATT del Politecnico di Torino presso Città Studi a Biella, all'interno di una camera climatica (ovvero un ambiente confinato in cui è possibile mantenere stabili i parametri di temperatura e umidità selezionati), nelle seguenti condizioni climatiche: 23°C e 57% di umidità relativa.

I vari test sono stati organizzati in giorni ravvicinati, sempre nella stessa fascia oraria in modo da minimizzare gli effetti dei cicli circadiani sulla fisiologia umana.

Il protocollo sperimentale comprende tre parti principali:

- 1) la prima parte comprende tutta una serie di operazioni che riguardano la misurazione del peso del tester, dell'abbigliamento indossato (maglietta e pantaloncini), la preparazione dello zaino con riempimenti in modo da raggiungere il 20% BW tester, una procedura di regolazione al fine di adattare gli zaini alla corporatura del tester, l'acquisizione dei valori di pressione tramite un sensore applicato tra corpo e zaino in 14 punti differenti, l'entrata del tester in camera climatica per un primo adattamento e, infine, l'applicazione di tutti i sensori e le apparecchiature utili per effettuare le varie misurazioni durante l'attività fisica svolta.
- 2) Nella seconda parte vi è lo svolgimento del test vero e proprio che si compone di: una prima parte della durata di 40 minuti, suddivisa in quattro fasi della durata di 10 minuti ognuna, in cui il soggetto svolge l'attività fisica sul tapis roulant, una seconda parte di 10 minuti con il tapis roulant fermo e lo zaino ancora indossato e una terza parte sempre di

10 minuti in cui il soggetto toglie lo zaino e si effettuano le termografie con l'uso di una termo camera.

Durante le quattro fasi di attività fisica, il tapis roulant è settato su diverse velocità e inclinazioni:

Fase 1: velocità 4 Km/h e inclinazione 0%

Fase 2: velocità 6 Km/h e inclinazione 12%

Fase 3: velocità 4 Km/h e inclinazione 0%

Fase 4: velocità 6 Km/h e inclinazione 15%

Le immagini ad infrarosso vengono acquisite sia per la schiena che per lo schienale a tre diversi tempi:

1. T50 = dopo essere trascorsi 50 minuti dall'inizio del test
2. T55 = dopo essere trascorsi 55 minuti dall'inizio del test
3. T60 = dopo essere trascorsi 60 minuti dall'inizio del test

- 3) L'ultima parte comprende tutte le operazioni di rimozione dei vari sensori e la ripetizione delle misurazioni del peso effettuate prima dell'inizio del test.

Le operazioni di adattamento dello zaino, accennate al punto 1) del protocollo sperimentale, vengono svolte per rendere gli zaini più ergonomici e consistono nella regolazione dello zaino (operazione che cambia da persona a persona) in modo da valutarne il giusto bilanciamento. Nel caso in cui si verifichi uno sbilanciamento, si va ad intervenire sulla distanza dello schienale dal corpo e sulla lunghezza degli spallacci.

Osservando la Fig. 5.1(a) si può notare la posizione dello schienale e degli spallacci rispetto al corpo mentre in Fig. 5.1(b) è mostrata la vista laterale della posizione della cintura pelvica.

È molto importante andare ad osservare come si distribuisce il peso dello zaino lungo il corpo. A tale proposito, tramite l'uso di un sensore di pressione, si vanno ad acquisire i valori di pressione in alcuni punti individuati come critici, dove lo zaino è a contatto con il corpo. Le acquisizioni vengono fatte sia nella configurazione in cui lo zaino è aperto (cintura lombare e toracica slacciate) che in quella in cui è chiuso (entrambe le cinture allacciate) come mostrato in Fig.5.2(a) e 5.2(b).

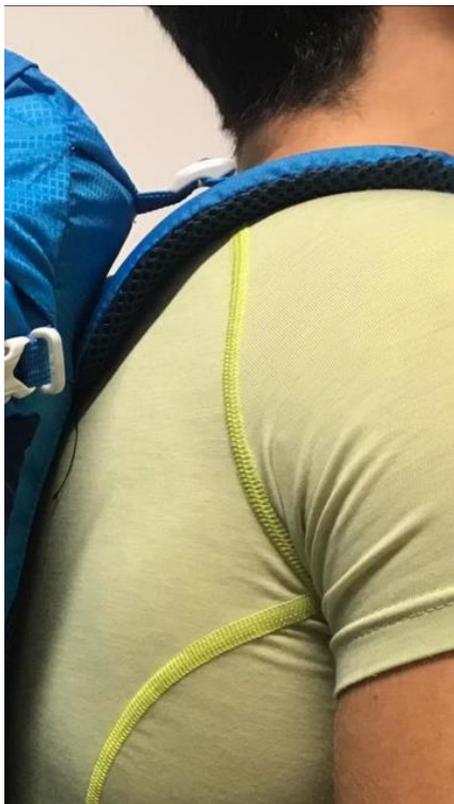
Durante le acquisizioni nelle due configurazioni, al soggetto viene somministrato un questionario sul comfort ergonomico dello zaino.

Al soggetto viene chiesto, ogni cinque minuti a partire dall'inizio del test fino alla fine della prima parte del test, di indicare il valore di stanchezza in base alla scala di Borg.

Per monitorare il cammino del soggetto durante il test e quindi osservare se lo zaino vada a determinare delle anomalie nel passo e nei diversi angoli che si formano tra i segmenti del corpo, vengono applicati dei marker e dei sensori inerziali in alcune parti del corpo definite nella tabella seguente (Tab 5.1). Infine, per osservare se durante il test, lo zaino abbia un effetto significativo sulla frequenza cardiaca e sul costo metabolico, vengono applicati un

cardiofrequenzimetro e un metabolimetro. In Fig. 5.3 si può osservare il soggetto prima dell'inizio del test con i vari sensori applicati.

Durante il test, viene somministrato al tester un questionario sul comfort termo-fisiologico con cadenza ogni cinque minuti, in cui il soggetto deve indicare la sensazione termica e di umidità sulla pelle. Infine, per osservare la temperatura media cutanea e l'umidità della pelle vengono applicati dei sensori di temperatura lungo il corpo e sullo zaino (Tab 5.1).

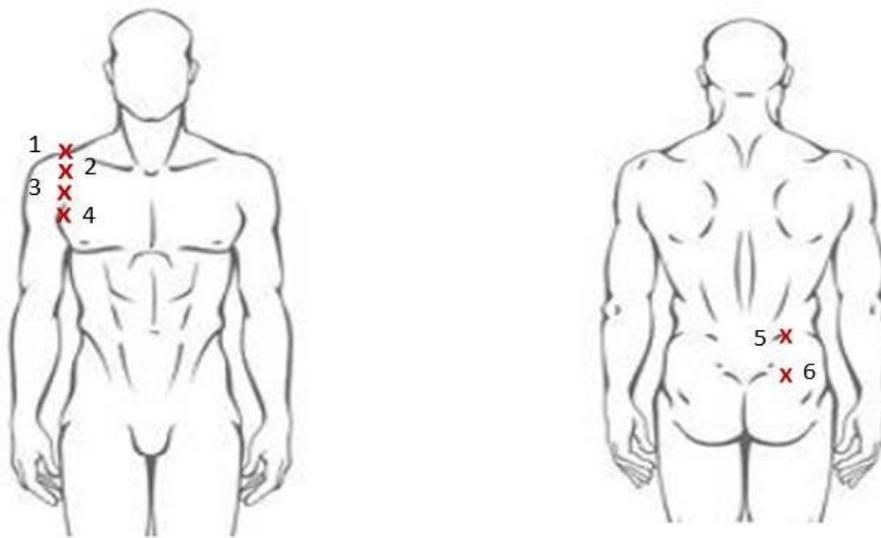


(a)

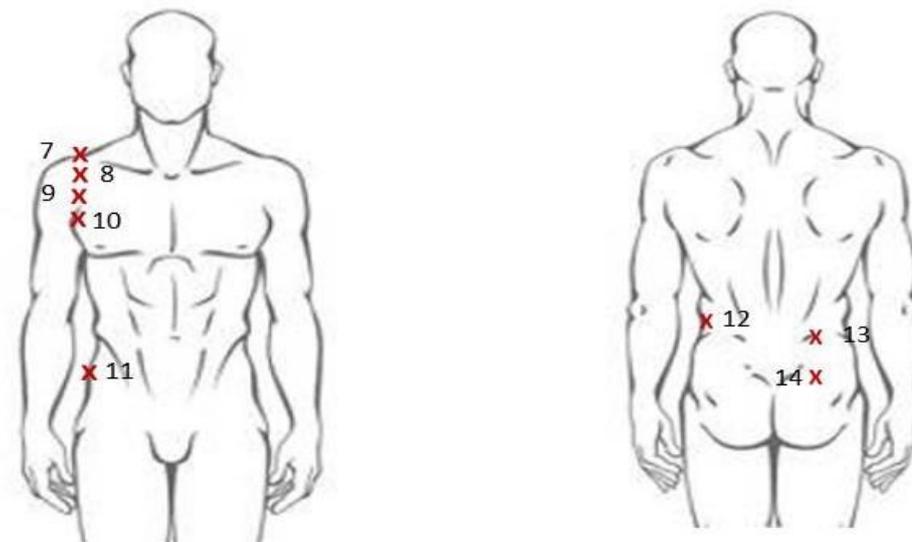


(b)

Figura 5.1: (a) Vista laterale della posizione dello schienale e degli spallacci a contatto con il corpo. (b) Vista laterale della posizione della cintura pelvica.



(a)



(b)

Figura 5.2: (a) Posizionamento sensori di pressione in configurazione zaino aperto. (b) Posizionamento sensori di pressione in configurazione zaino chiuso (anteriormente a sinistra e posteriormente a destra).

Posizionamento marker	Posizionamento sensori d'inerzia	Posizionamento sensori di temperatura e umidità
Tempia	Sotto il ginocchio sinistro (tibia prossimale)	Fronte
C6	Sotto il ginocchio destro (tibia prossimale)	Scapola destra
Collo (posizione laterale destra)	Ombelico (senza interferire con la fascia dello zaino)	Pettorale sinistro
Spalla (posizione laterale destra)	Collo posteriormente (sotto il marker posizionato in C6)	Deltoide destro
Anca (zaino)	Schienale dello zaino (parte rigida all'altezza del collo)	Gomito sinistro
Gluteo	---	Mano sinistra
Cresta iliaca	---	Coscia destra
Ginocchio epicondilo laterale	---	Polpaccio sinistro
Malleolo laterale	---	Scapole (due sensori)
Piede posteriore (sulla scarpa in corrispondenza del calcagno)	---	Parte interna del tessuto in posizione posteriore (altezza zona lombare)
Piede anteriore (sulla scarpa in corrispondenza del quinto dito)	---	Schienale dello zaino
Zaino parte laterale superiore	---	Bordo laterale dello spallaccio
Zaino parte laterale inferiore	---	---

Tabella 5.1: Posizionamento marker, sensori inerziali e di temperatura nel copro e nello zaino



Figura 5.3: Soggetto prima dell'inizio del test.

6 Analisi delle immagini termografiche

6.1 Introduzione

Le immagini termiche acquisite sono state elaborate considerando delle regioni di interesse (ROI), come verrà mostrato nel paragrafo 6.3. Questo comporta un livello di dettaglio molto elevato che dipende fortemente dall'operatore. A tale proposito viene presentato un protocollo di gestione e selezione delle immagini automatizzato in modo che i dati acquisiti non siano operatore-dipendenti e i risultati siano riproducibili.

Questo capitolo ha lo scopo di presentare il modo in cui sono state elaborate le immagini termografiche acquisite durante l'attività sperimentale e un metodo, basato sulla matrice di Co-occorrenza, per l'estrapolazione dei parametri utili all'analisi.

6.2 Gestione e conversione delle immagini

Da una prima indagine sulle immagini ricavate tramite l'uso di una termo camera, appare immediatamente evidente come per ognuna delle immagini, in fase di acquisizione, è stato adottato un range di temperatura avente come estremo superiore il valore di temperatura massimo rilevato e come estremo inferiore il valore di temperatura minimo rilevato. Dal momento che per l'attività sperimentale sono stati utilizzati nove zaini di dimensioni e materiali diversi e quindi per ognuno di essi è stata utilizzata una scala di temperatura specifica, è stato necessario introdurre delle modifiche. A tale proposito, è stato utilizzato un modello valido per tutte le immagini in cui viene applicato lo stesso range di temperatura per l'intera gamma di zaini. Questa operazione è estremamente necessaria per andare a confrontare immagini diverse. Il range è stato scelto in modo da tenere in considerazione sia il valore minimo che quello massimo tra le immagini da analizzare. Per ogni immagine è stato selezionato come estremo superiore una $T = 25.5^{\circ}\text{C}$ ed estremo inferiore una $T = 11.5^{\circ}\text{C}$. Grazie al modello utilizzato sono state garantite due condizioni:

1. La scala di temperatura scelta per le diverse immagini comprende con buon margine di sicurezza i valori di temperatura riportati sugli schienali evitando la comparsa di outliers;
2. È possibile processare più immagini contemporaneamente grazie all'utilizzo di procedure automatizzate.

Le immagini a colori a cui viene fatto riferimento (formato RGB), sono state convertite in scala di grigio e codificate su 8 bit quindi discretizzate su un numero di livelli pari a $2^8 = 256$. Al valore 0 viene fatta corrispondere la temperatura di 11.5°C mentre al valore 255 la temperatura di 25.5°C . Ogni immagine è stata salvata utilizzando una specifica nomenclatura come mostrato in Fig. 6.1:



T060851R_SpeedLite26_T50

Figura 6.1: Immagine schienale zaino in scala di grigio

- T#####: codice identificativo immagine termografica;
- Il suffisso IR indica che si tratta di immagini ad infrarossi;
- Nome dello zaino a cui si sta facendo riferimento;
- T#: definizione tempo di acquisizione durante il test T50, T55 o T60;
- JPG: formato dell'immagine.

Nell'esempio sopra riportato viene fatto riferimento allo zaino SpeedLite26 dopo che sono trascorsi 50 minuti dall'inizio del test. Tenendo conto che per ogni schienale è stata acquisita un'immagine al tempo T50, T55 e T60, il numero totale di immagini processate per lo studio in esame è $3 \times 9 = 18$.

6.3 Selezione immagini e definizione area d'interesse

Le immagini termografiche degli schienali, salvate utilizzando la nomenclatura descritta nel precedente paragrafo 6.2, sono state allocate in una cartella di lavoro specifica per ogni tipo di zaino. In questo modo, è possibile per l'utente selezionare più immagini contemporaneamente, semplicemente accedendo alla specifica cartella di lavoro in cui è presente lo zaino d'interesse. Una volta avviato l'algoritmo, per ogni immagine selezionata viene visualizzata una GUI (Graphic User Interface), ovvero un'interfaccia grafica che consente all'utente di selezionare parti di un grafico/immagine, nella quale è necessario fissare quattro punti. L'obiettivo è quello di ritagliare nell'immagine di partenza una finestra rettangolare in modo da selezionare solo l'area dello schienale dello zaino a contatto con la schiena del soggetto. In Fig. 6.2, sempre con riferimento alla Fig. 6.1, viene mostrata l'interfaccia visualizzata dall'utente con i quattro punti d'interesse scelti dall'operatore: a tale proposito, ogni punto selezionato rappresenta uno dei quattro vertici del rettangolo.

Una volta selezionata l'area d'interesse, l'algoritmo crea una maschera binaria che consente, tramite le successive operazioni, di processare solamente i valori dei pixel interni al rettangolo selezionato. Moltiplicando la maschera binaria per l'area del rettangolo contenente i valori di temperatura dell'immagine processata, si ottiene una nuova immagine in cui compaiono solamente i valori di temperatura interni al rettangolo mentre i restanti pixel assumono un valore nullo.

Nella Fig. 6.3 viene visualizzata l'area interna al rettangolo selezionato in Fig. 6.2. Questa sarà l'immagine su cui si andranno ad effettuare tutte le operazioni descritte nella sezione successiva 6.4.

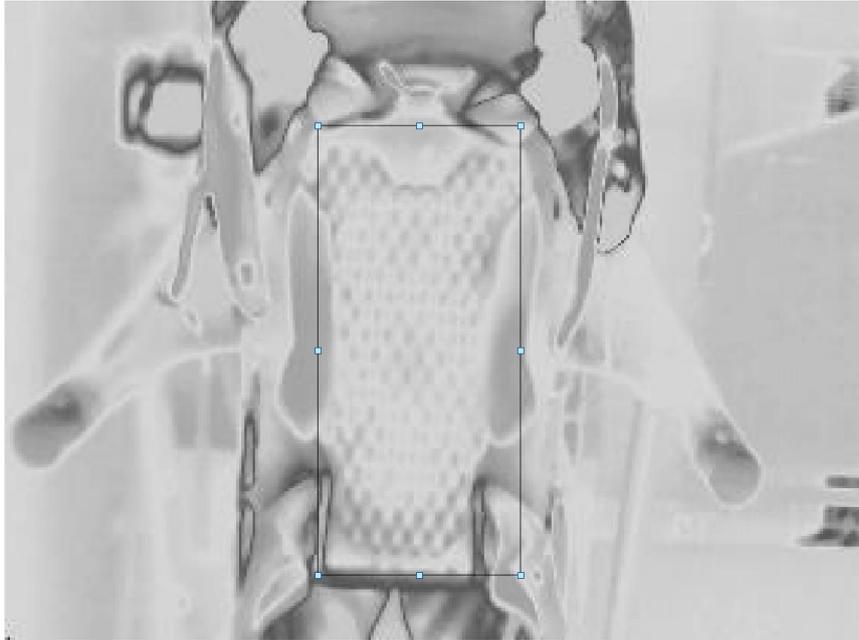


Figura 6.2: Nell'immagine viene visualizza l'interfaccia grafica nella quale è possibile selezionare l'area d'interesse.

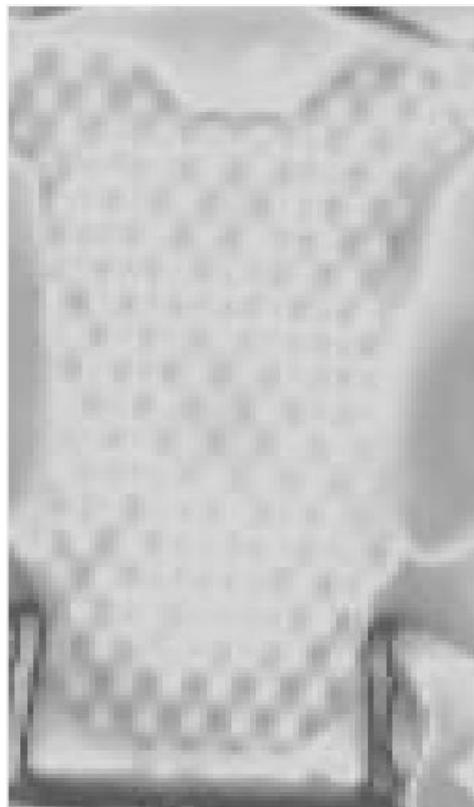


Figura 6.3: L'immagine mostra l'area selezionata tramite il rettangolo

6.4 Matrice di co-occorrenza GLCM

Il metodo della matrice di co-occorrenza (GLCM) mira a identificare le caratteristiche delle texture di un'oggetto dell'immagine analizzando le differenze d'intensità dei pixel vicini. Essendo un metodo basato sulla manipolazione di livelli di grigio di un'immagine, la prima operazione da compiere su immagini digitali è la conversione in scala di grigi.

Poiché le immagini vengono solitamente codificate su 8 bit quindi discretizzate su 256 livelli, i valori di livello di grigio vengono normalizzati nell'intervallo $[0, 255]$, dove allo 0 viene attribuito il colore nero e al 255 quello bianco. La scelta dei toni di grigio è fondamentale per le operazioni computazionali da svolgere sulla matrice GLCM. Un aumento dei livelli di grigio permette di aumentare la sensibilità con cui andiamo a scansionare l'immagine di partenza a discapito, però, di maggiori tempi di elaborazione e costi computazionali.

La matrice di Co-occorrenza è una matrice quadrata ($N \times N$) con N pari al numero di livelli di grigio dell'immagine.

Per comprendere al meglio ciò che è stato detto, si consideri una matrice 4×4 in cui ad ogni pixel è associato un certo livello di grigio (Fig. 6.4), mentre in Fig. 6.5 compaiono i valori numerici corrispondenti.

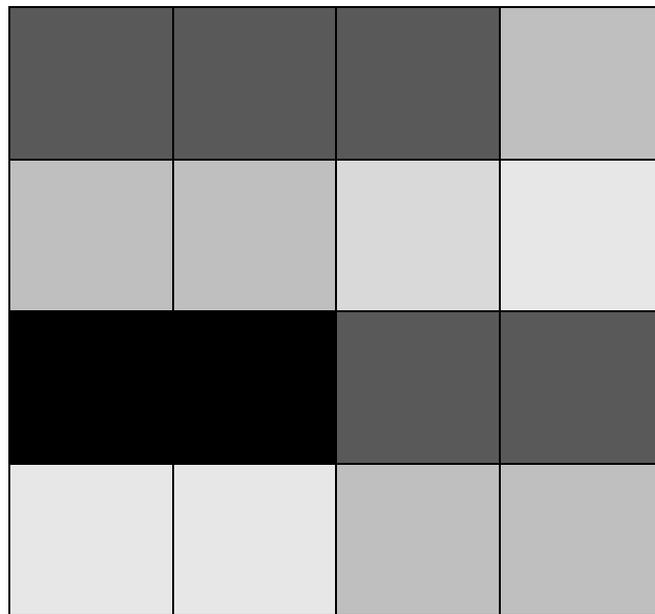


Figura 6.4: Matrice con toni di grigio

70	70	70	180
180	180	210	210
0	0	70	70
210	210	180	180

Figura 6.5: Matrice con valori numerici corrispondenti

Dopo aver ottenuto l'immagine in scala di grigio, il calcolo della GLCM viene effettuato andando a scansionare l'immagine di partenza con un vettore caratterizzato da una dimensione d e una direzione del passo θ . La scelta della lunghezza del vettore e l'orientazione sono fortemente influenzate dal tipo di analisi che si va ad effettuare; per questo motivo bisogna trovare un set adatto di caratteristiche e parametri per lo specifico set di dati che viene utilizzato.

La scelta della dimensione del vettore d non deve essere troppo grande in modo da evitare di perdere alcune transizioni cromatiche (tipicamente si sceglie una distanza di campionamento tra 1 e 2). Con una finestra di campionamento ridotta c'è una maggiore probabilità di rilevare pixel caratterizzati dalla stessa intensità di grigio.

Per quanto riguarda la scelta dell'orientazione bisogna tenere presente che ogni pixel è circondato da un insieme 8 connesso con $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ ma scegliere $\theta = 0^\circ$ o $\theta = 180^\circ$ è equivalente ai fini del calcolo della GLCM. Per questo motivo, la GLCM è spesso calcolata per le seguenti direzioni di scansione: $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$. Le seguenti orientazioni si riferiscono rispettivamente alle direzioni: orizzontale, diagonale destra, verticale e diagonale sinistra come mostrato in Fig. 6.6.

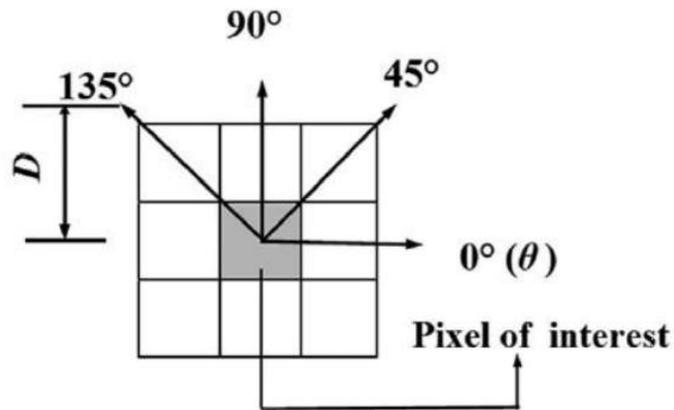


Figura 6.6: Direzione scansione matrice GLCM [49]

La scansione inizia a partire dall'estremità in alto a sinistra. Una volta terminata la costruzione della matrice di co-occorrenza ogni elemento (i, j) della GLCM corrisponde al numero di occorrenze usate per confrontare una coppia di livelli di grigio i e j , ovvero, rappresenta quante volte i pixel di valore i e j compaiono come sequenza di due pixel in base alla direzione θ e la distanza d . In Fig. 6.7 è possibile visualizzare la GLCM dell'esempio in Fig. 6.4.

	1 (0)	2 (70)	3 (180)	4 (210)
1 (0)	1	1	0	0
2 (70)	0	3	0	1
3 (180)	0	0	0	0
4 (210)	0	0	0	6

Figura 6.7: GLCM Fig. 6.4

In base all'immagine che si vuole analizzare, i pixel possono effettuare delle transizioni cromatiche da un tono di grigio ad un altro con un certo andamento. Questo è dovuto al fatto che, ciascuna matrice di co-occorrenza viene espressa in termini di probabilità tenendo conto di tutte le transizioni che avvengono all'interno dell'immagine. Ogni cella della matrice GLCM

viene divisa per tutte le possibili combinazioni che si possono presentare. Pertanto, per calcolare i valori assunti dalla matrice si utilizza l'Eq.6.1:

$$P(i, j) = \frac{C(i, j)}{\sum_{i,j=1}^N C(i, j)}$$

6.1

Dove P (i, j) è la probabilità ricavata dalla GLCM, C (i, j) corrisponde al valore assunto dalla cella (i, j) nella matrice e N è il numero di righe e colonne. I valori di probabilità ricavati dall'immagine scelta come riferimento sono mostrati in Fig. 6.8.

Andando ad osservare la matrice GLCM espressa in termini di probabilità si può osservare come la transizione dal pixel di valore nero a quello di valore bianco assume un valore di possibilità molto basso. Questo è dovuto al fatto che la transizione cromatica non avviene in maniera netta ma passando per diversi livelli di grigio. I valori di probabilità ottenuti tramite l'applicazione dell'Eq.6.1 saranno utilizzati per il calcolo dei parametri che verranno descritti nella prossima sezione.

	1	2	3	4
1	0,083	0,083	0	0
2	0	0,25	0	0,083
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0,5

Figura 6.8: GLCM espressa in termini di probabilità

6.4.1 Parametri ricavati dalla GLCM

La matrice GLCM permette di definire una relazione spaziale tra pixel che compongono l'immagine: questa metodologia è stata definita tra le migliori per l'estrazione delle caratteristiche della texture di un'immagine. Il primo studioso ad introdurre questo tipo di analisi fu Halarick con la proposta di 13 indicatori per la discriminazione di immagini con toni di grigio. Per questo lavoro di tesi sono stati scelti quattro parametri fondamentali: Contrasto, Omogeneità, Entropia e Correlazione, ognuno di essi fornisce un'informazione sull'omogeneità ed eterogeneità dei toni di grigio che caratterizzano un'immagine. La matrice di co-occorrenza descritta nella sezione 6.4 viene utilizzata esclusivamente come strumento per ricavare tali informazioni. In questo paragrafo, vengono descritti dettagliatamente gli indici che sono stati utilizzati durante l'attività sperimentale.

6.4.1.1 Contrasto

Il calcolo di questo indicatore fornisce una misura della differenza tra il valore più grande ed il valore più piccolo all'interno di un set di pixel contigui, nello specifico, quello che viene calcolato è l'ammontare delle variazioni locali che sono presenti all'interno dell'immagine. Il contrasto assume valori molto piccoli quanto più omogenea è l'intensità dei pixel all'interno dell'immagine, contrariamente, il suo valore aumenta all'aumentare delle transizioni cromatica presenti nell'immagine. La formula principale utilizzata nel calcolo di questo indicatore è quella mostrato nella Eq.6.2:

$$Contrasto = \sum_{i,j=1}^N P(i,j)(i-j)^2 \quad \boxed{6.2}$$

dove $P(i, j)$ è la probabilità ricavata dalla GLCM descritta nella sezione 6.4.

Un'immagine che presenta un solo tono di grigio è caratterizzata da un valore di contrasto pari a 0.

Il contrasto, dunque, rappresenta la capacità di un pixel ad effettuare una transizione cromatica di toni di grigio. Più grande è il valore del contrasto, maggiori sono le variazioni locali di intensità, ovvero, una maggiore variazione dei pixel a livello di grigio. Inoltre, nel caso in cui la matrice GLCM fosse una matrice diagonale, avremmo un valore di contrasto molto basso in quanto i pixel tendono a mantenere il proprio tono di grigio.

6.4.1.2 Omogeneità

Questo parametro fornisce una misura della vicinanza tra la distribuzione della matrice GLCM con gli elementi della diagonale principale. Lungo la diagonale principale sono presenti le frequenze delle coppie di pixel con lo stesso valore di grigio; diversamente dal contrasto, più omogenea è l'intensità dei pixel nell'oggetto dell'immagine, più alto è il valore di questo parametro. L'omogeneità assume valore massimo, pari a 1, quando un'immagine è

caratterizzata da un unico tono di grigio. Il calcolo di questo indicatore è ottenuto mediante l'equazione Eq. 6.3:

$$Omogeneita = \sum_{i,j=1}^N \frac{P(i, j)}{1 + |i - j|} \quad \boxed{6.3}$$

Da questa formula, è facile intuire che, più ci si discosta dalla diagonale principale della matrice GLCM, più il denominatore aumenta con conseguente diminuzione del parametro d'interesse. Infine, il valore di omogeneità aumenta quanto più la matrice GLCM tende a diventare una matrice diagonale, in quanto i pixel tenderanno ad assumere lo stesso tono di grigio.

6.4.1.3 Entropia

L' Entropia esprime il grado di disordine o la complessità di un'immagine. Il suo valore cresce se la probabilità $P(i, j)$ si distribuisce abbastanza uniformemente all'interno della matrice della probabilità. Questa situazione si presenta quando non ci sono coppie di tonalità di grigio che si ripetono rispetto ad altre. Il valore di questo indicatore è ottenuto mediante l'equazione Eq. 6.4:

$$Entropia = - \sum_{i,j=1}^N P(i, j) \log P(i - j) \quad \boxed{6.4}$$

secondo la convenzione: $\log P(i, j) = 0$ se $P(i, j) = 0$. L'Entropia è inversamente proporzionale all'Omogeneità, infatti, come per il contrasto, assume valori maggiori se i pixel hanno un elevato grado di dispersione.

Questo parametro assume il valore massimo solo nel caso in cui il livello di grigio assunto da ogni singolo pixel viene estratto da una distribuzione di probabilità di tipo uniforme. In questa configurazione limite, infatti, ogni transizione cromatica si manifesta con la stessa probabilità dunque ogni elemento della GLCM avrà lo stesso valore di $P(i, j)$. In definitiva, il valore massimo che può raggiungere tale parametro, dipende dal numero di bit su cui viene codificata l'immagine, maggiore è tale numero, maggiore sarà il valore assumibile da questo indicatore.

6.4.1.4 Correlazione

Con questo parametro si vuole esprimere una relazione lineare tra due variabili statistiche tale che a ciascun valore della prima variabile corrisponda con una certa regolarità un valore della seconda. Per quanto riguarda il caso preso in esame, viene fornita una stima di quanto un tono di grigio è correlato con tutti i possibili livelli che caratterizzano l'intera immagine. A tale

proposito vengono definite due variabili aleatorie i e j che identificano tutti i possibili toni di grigio che può assumere un pixel. Dal momento che la matrice GLCM espressa in termini di probabilità fornisce una densità di probabilità congiunta $P(i, j)$, è possibile calcolare le marginali $P(i)$ e $P(j)$ mediante l'applicazione della Eq. 6.5:

$$P(i) = \sum_{j=1}^N P(i, j) \quad P(j) = \sum_{i=1}^N P(i, j) \quad \boxed{6.5}$$

Una volta ricavata la densità di probabilità per ogni variabile, si possono stimare il valore medio (μ) e la varianza (σ^2) delle distribuzioni attraverso l'utilizzo delle equazioni Eq. (6.6) (6.7):

$$\mu_i = \sum_{i=1}^N iP(i) \quad \mu_j = \sum_{j=1}^N jP(j) \quad \boxed{6.6}$$

$$\sigma_i^2 = \sum_{i=1}^N (i - \mu_i)^2 P(i) \quad \sigma_j^2 = \sum_{j=1}^N (j - \mu_j)^2 P(j) \quad \boxed{6.7}$$

Per il calcolo di questo parametro è utilizzata l'espressione analitica mostrata nella equazione Eq. 6.8:

$$Correlazione = \sum_{i,j=1}^N \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)P(i, j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad \boxed{6.8}$$

Il coefficiente di correlazione assume valore 1 nel caso di perfetta correlazione positiva tra le due variabili ($i=j$), valore -1 in caso di perfetta correlazione negativa ($i = -j$). Questo parametro è nullo al verificarsi di una di queste due condizioni: quando tra le due variabili c'è una dipendenza non lineare o quando le due variabili sono staticamente indipendenti. Perciò, quando i e j sono indipendenti, la probabilità congiunta può essere espressa come prodotto delle singole probabilità come mostrato nella Eq. 6.9:

$$P(i, j) = P(i)P(j) \quad \boxed{6.9}$$

Sostituendo la 6.9 nella 6.8 e facendo riferimento all'equazione 6.6 otteniamo l'uguaglianza espressa nella Eq.6.10:

$$\begin{aligned}
\text{Correlazione} &= \sum_{i,j=1}^N \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)P(i)P(j)}{\sigma_i \sigma_j} \\
&= \sum_{i=1}^N \frac{(i - \mu_i)P(i)}{\sigma_i} \sum_{j=1}^N \frac{(j - \mu_j)P(j)}{\sigma_j} \\
&= \sum_{i=1}^N \frac{(\mu_i - \mu_i)}{\sigma_i} \sum_{j=1}^N \frac{(\mu_j - \mu_j)}{\sigma_j} = 0
\end{aligned}$$

6.10

Tanto maggiore è (in modulo) la correlazione tra due variabili, tanto più la conoscenza del valore dell'una è utile a prevedere il valore dell'altra.

6.4.2 Esempi emblematici e considerazioni

Per una migliore comprensione del significato dei parametri elencati nella sezione precedente, è utile andare ad osservare qualche esempio emblematico in cui vengono riportati dei casi particolari. Questa sezione si prefigge l'obiettivo di far comprendere come gli indicatori estrapolati della matrice di co-occorrenza siano fortemente legati alla scelta di due parametri fondamentali: distanza di campionamento d e direzione di scansione θ .

Esempio 1 Il primo esempio a cui si fa riferimento è quello di un'immagine binaria che consiste in un quadrato bianco su sfondo nero (Fig. 6.9) e una in cui il quadrato bianco viene disperso nello sfondo nero preservandone l'area (le immagini artificiali sono state scelte in modo tale che il numero totale di pixel bianchi e neri fosse uguale) come mostrato in Fig. 6.10(a). Osservando l'andamento dei parametri in Fig. 6.10(b) per ognuno dei due casi presi in esame, è possibile notare come sia il valore di contrasto che di entropia aumentino notevolmente nel secondo caso a causa dell'incremento del numero di transizioni. L'omogeneità, invece, diminuisce leggermente in quanto nel primo caso si viene a creare una matrice GLCM quasi diagonale, cosa che non avviene per la seconda immagine. Infine, la correlazione si abbassa in maniera considerevole, questo è dovuta alla dispersione dei pixel bianchi su fondo nero.

Esempio 2 Si consideri adesso un'immagine in cui i pixel assumono valori di grigio crescenti come mostrato in Fig. 6.11. Si procede adesso con il calcolo della matrice di co-occorrenza e dei parametri descritti nella sezione 5.3.1 facendo variare $d = 1, \dots, N$ con N pari al numero di toni di grigio che compongono l'immagine e fissando il parametro dell'orientazione $\theta=0^\circ$ (orizzontale). Da una prima osservazione della Fig. 6.12 è possibile trarre alcune considerazioni: il contrasto assume un andamento quadratico crescente in funzione della

lunghezza del vettore d . Questa condizione è giustificata dal fatto che si tratta di un'immagine con valori di grigio crescenti nella direzione di scansione θ . In sostanza è come se, aumentando la lunghezza del vettore d , diminuissero i toni di grigio che compongono l'immagine e di conseguenza il numero delle possibili transizioni cromatiche. Considerando tale comportamento, è plausibile aspettarsi un andamento decrescente del parametro chiamato Entropia. Infatti, riducendo i toni di grigio, vi è una conseguente riduzione della complessità dell'immagine fino a raggiungere la situazione limite in cui è consentita sola la transizione 0-1 (caso esaminato nel primo esempio). Per quanto riguarda il parametro chiamato omogeneità, esso assume un andamento iperbolico decrescente dovuto al fatto che i pixel non conservano mai lo stesso livello di grigio lungo la direzione di scansione scelta. Infine, trattandosi di un'immagine con valori di grigio crescenti, la scelta della distanza di campionamento non ha effetto sulla Correlazione. A tal proposito, ogni pixel con livello di grigio che compone l'immagine può effettuare un'unica transizione secondo una legge lineare. La situazione in esame, infatti, mostra una condizione di massima correlazione positiva tra le variabili aleatorie (i, j) indipendentemente dalla scelta di d .

Esempio 3 Sempre con riferimento alla Fig. 6.11 in cui è stata fissata una distanza di campionamento pari a $d = 1$, analizzando i grafici in Fig. 6.13 è evidente come i parametri assumono un andamento diverso al variare di θ nonostante si riferiscano alla stessa immagine. Questa situazione fa capire quanto la scelta della direzione di scansione θ influisca sull'analisi finale che viene fatta su un'immagine. Prendendo in considerazione, per esempio, l'immagine con una direzione di scansione fissata a $\theta = 90^\circ$, ovvero un'immagine in cui i pixel vengono confrontati in maniera verticale, è possibile visualizzare un valore nullo di contrasto dovuto al fatto che l'immagine viene considerata, per la costruzione della matrice GLCM, come un'immagine con livelli di grigio costanti. Inoltre, sempre per questo motivo si osserva un valore massimo sia di Omogeneità che di Correlazione, mentre il valore di Entropia non cambia al variare di θ . Infine, osservando l'immagine presa in considerazione per una direzione di scansione pari a 45 e 135° (immagine scansionata lungo le due diagonali), si può osservare come i valori degli indicatori siano uguali a quelli dell'immagine in cui si è fissato il parametro dell'orientazione a $\theta = 0^\circ$.

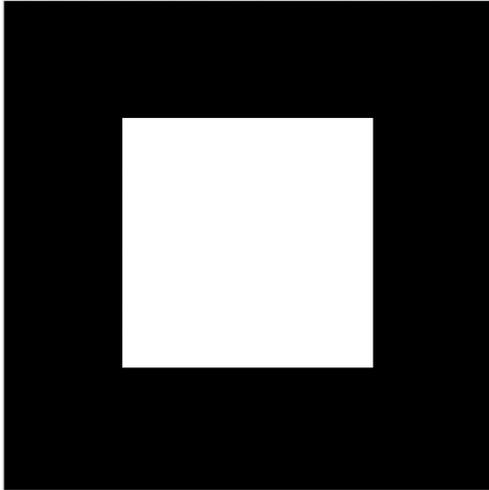
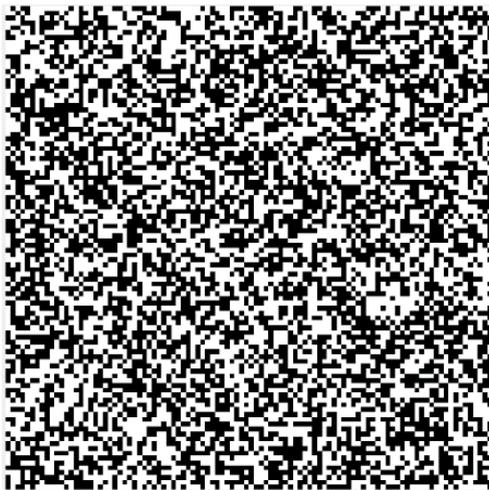
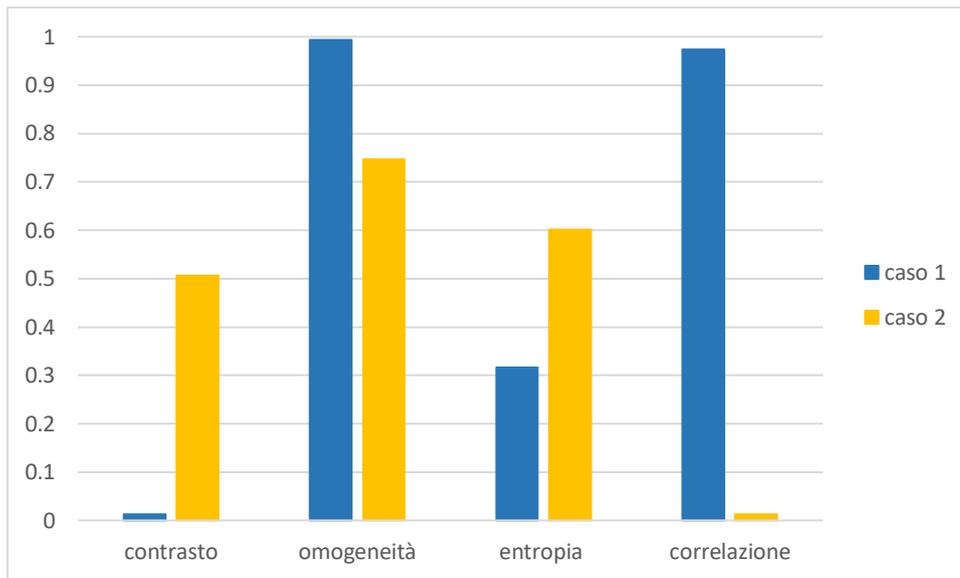


Figura 6.9: Quadrato bianco su sfondo nero.



(a)



(b)

Figura 6.10: (a) la superficie del quadrato bianco in Fig.4.6 viene dispersa sullo sfondo nero. (b) Confronto andamento dei parametri per i due casi.

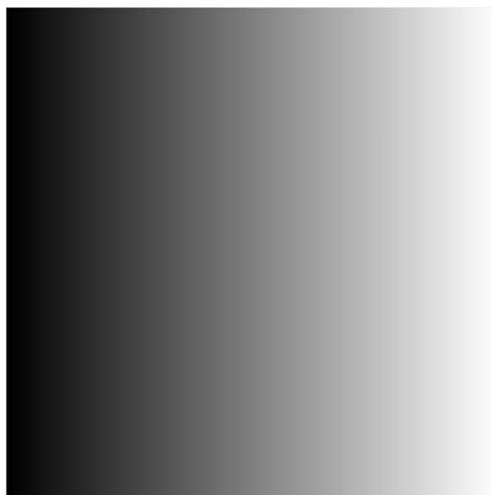


Figura 6.11: Immagine sfumata con valori di grigio crescenti su 256 livelli.

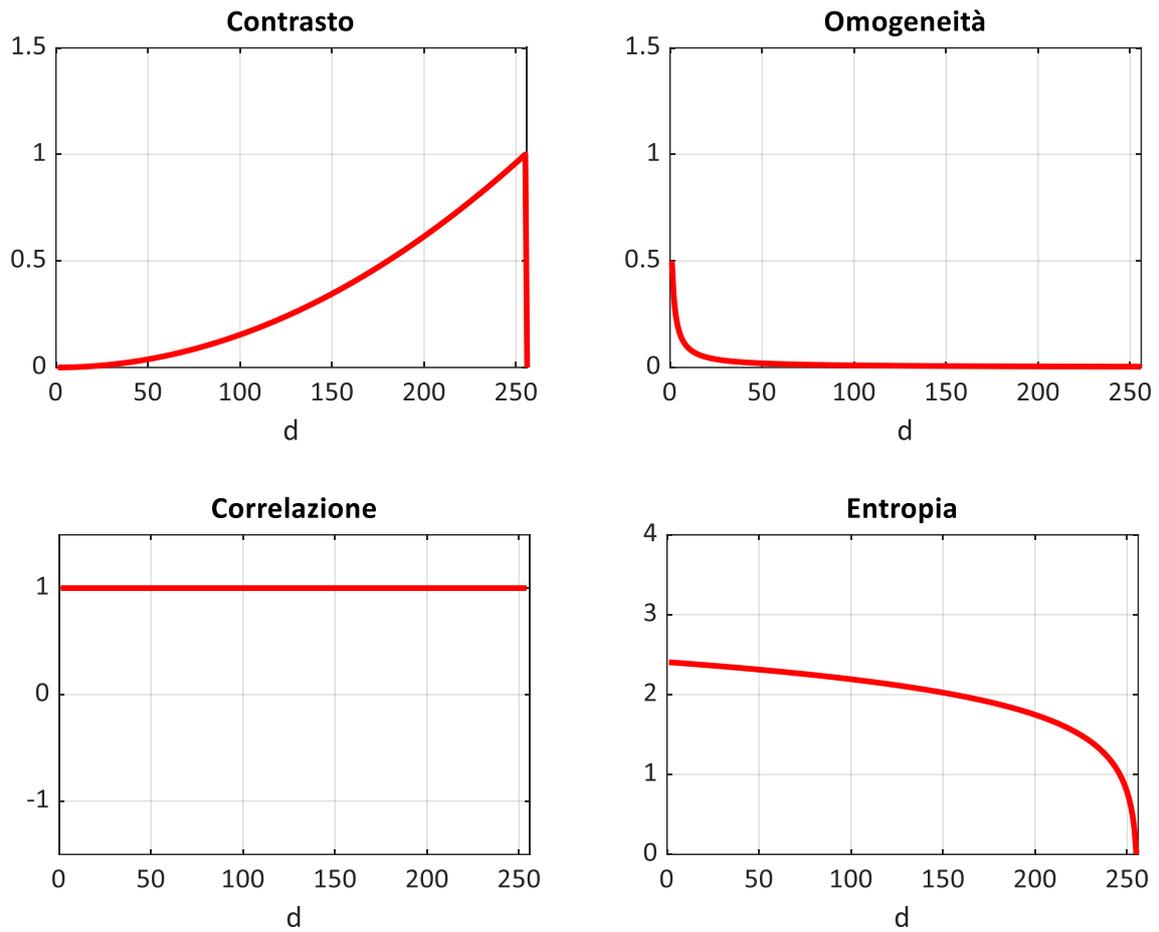


Figura 6.12: I seguenti andamenti sono stati ricavati fissando una direzione di scansione $\vartheta = 0^\circ$.

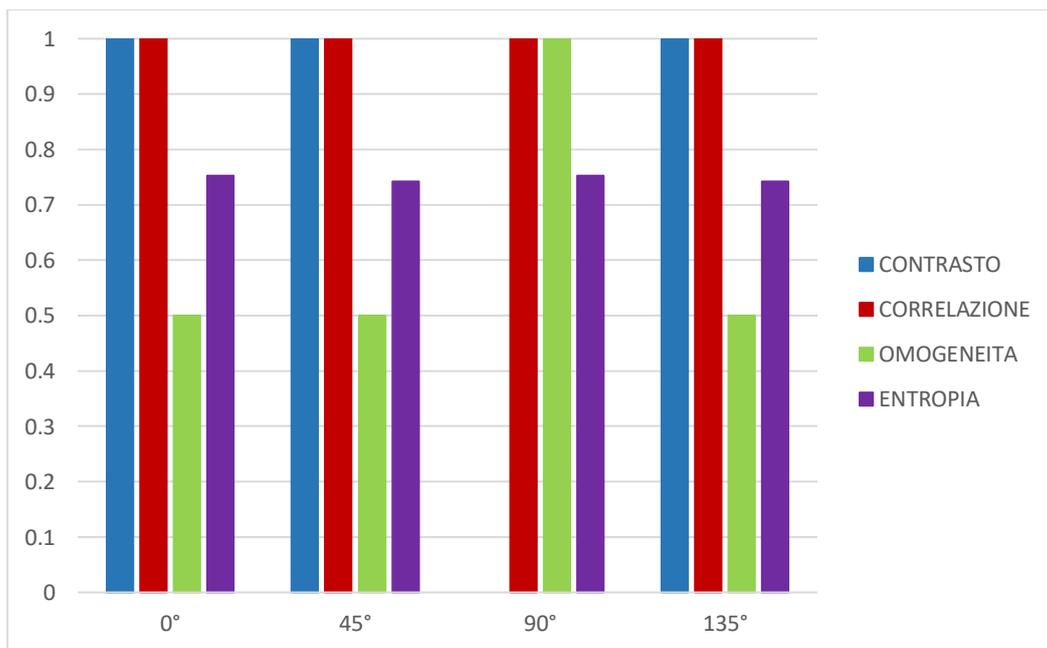


Figura 6.13: Andamento di Contrasto, Correlazione, Omogeneità ed Entropia al variare della direzione di scansione ϑ

7 Risultati e conclusioni

Nella prima sezione di questo capitolo viene presentato nel dettaglio il funzionamento dell'algoritmo realizzato in ambiente Matlab per l'estrapolazione dei parametri ottenuti attraverso l'utilizzo della matrice di Co-Occorrenza. Segue una sezione in cui vengono riportati gli andamenti di tali parametri. Infine, una sezione in cui viene presentata una panoramica generale dell'analisi statistica condotta e dei dati estrapolati da essa. L'obiettivo dell'analisi è la valutazione statistica dell'andamento della distribuzione di temperatura lungo gli schienali degli zaini. A tale proposito, è stato utilizzato un particolare test, detto Kruskal-Wallis, per determinare quali sono i parametri da utilizzare per discriminare gli zaini che presentano valori significativamente diversi a livello di distribuzione di temperatura.

7.1 Codice per l'estrapolazione dei parametri

Per l'estrapolazione dei parametri dalla matrice di Co-Occorrenza si è utilizzato come linguaggio di programmazione Matlab, un programma per l'analisi numerica che permette di visualizzare funzioni, elaborare dati, realizzare interfacce ed implementare algoritmi.

Il primo blocco del programma comprende tutte le operazioni che devono essere svolte per lavorare con immagini in scala di grigio (Fig. 7.1).

Inizialmente il codice esegue l'importazione delle immagini ricavate dalle termografie. L'immagine importata viene prima convertita in scala di grigio e successivamente i valori di grigio vengono settati all'interno di un range prefissato. Questa operazione è estremamente necessaria per andare a confrontare immagini diverse.

```

1 -   clc
2 -   clear all
3 -   close all
4
5 -   [filelist path] = uigetfile('*.jpg','MultiSelect', 'on'); %per scegliere
6 -   %manualmente i file
7 -   imageArray = cell(size(filelist));
8 -   if ~iscell(filelist);
9 -       filelist={filelist};
10 -  end
11 -  %la cella mi consente di compattare meglio i miei vettori perchè posso
12 -  %inserire tutto quello che voglio al suo interno. In questo caso infatti
13 -  %riesco a creare un vettore di 4 colonne ma ogni colonna contiene delle
14 -  %matrici con dimensioni
15 -  range=(25.5-11.5)/1; % ho un range di temperature che vanno da 11.5 a 25.5
16 -  %esprese su 256 livelli, quindi ho una risoluzione di 0.0547 gradi celsius.
17 -  %divido per 1 poiche corrisponde al valore normalizzato
18 -  for i=1:size(filelist,2)
19 -      imageArray{i} = imread(fullfile(path,filelist{i})); % con fullfile riesco
20 -      %a dare ad imread sia il path che il nome del file
21 -      IR_gray_array_bis(:, :, i)=im2double(rgb2gray(imageArray{i})); % le matrici
22 -      %devono essere tutte della stessa dimensione quindi posso salvare solo quelle
23 -      %in IR
24 -      IR_gray_array(:, :, i)=IR_gray_array_bis(:, 1:320, i);
25 -      IR_gray_Temp(:, :, i)=11.5+range.*IR_gray_array(:, :, i);
26 -      figure, imshow(IR_gray_Temp(:, :, i), [11.5 25.5]); title(sprintf('image %s', filelist{i}));
27 -      % posso rappresentare un double ma devo dire di adattarsi alla sua dinamica
28 -  end
29 -  clear i;
30

```

Figura 7.1: Codice Matlab per lavorare su immagini termografiche

Il secondo blocco comprende le operazioni di selezione dell'area di interesse su cui sarà successivamente eseguito il calcolo della matrice GLCM (Fig. 7.2).

Una volta selezionata l'immagine in scala di grigio su cui si vuole lavorare, utilizzando l'interfaccia grafica di Matlab, si selezionano i vertici del rettangolo che comprende l'area di interesse. A questo punto Matlab ci restituisce un'immagine in cui ai pixel esterni è attribuito il valore 0 (colore nero), mentre a quelli interni all'area selezionata viene attribuito il valore corrispondente al livello di grigio dell'immagine selezionata in precedenza. L'operazione successiva consiste nell'eliminazione dello sfondo e quindi di tutti i pixel di valore 0. Con l'utilizzo del ciclo for è possibile scorrere su tutti i pixel dell'immagine e sostituire il valore 0 con un "Not a Number" (NaN) in modo che quei valori non vengano presi in considerazione nelle successive operazioni.

L'ultima operazione prima della creazione della matrice GLCM consiste nell'incrementare i valori dell'immagine ricavata di sette. Questa operazione è necessaria in quanto corrisponde al valore di taratura della termocamera.

```

31  %% Selezione area d'interesse
32  for i=1:size(filelist,2)
33      G(:,:,i)=IR_gray_Temp(47:221,117:192,i); %mi permette di selezionare il
34      %rettangolo d'interesse
35      figure,imshow(G(:,:,i),[11.5 25.5]); title(sprintf('image %s',filelist{i}));
36      %immagine in scala di grigi dell'area selezionata
37  end
38  clear i;
39
40  %coordinate rettangolo
41  x1=117;
42  x2=192;
43  y1=47;
44  y2=221;
45  Coordinate=[y1 y2 x1 x2];
46  %% Eliminazione sfondo per il calcolo della GLCM matrix
47  for i = 1:size(G,1)
48      for j = 1 :size(G,2)
49          if G(i,j)>0
50              Z(i,j)=G(i,j);
51          else
52              Z(i,j)=NaN; %assegno un NaN a tutti i pixel dello sfondo
53          end
54      end
55  end
56
57  Z=7+Z; %aumento di 7°C ogni valore dell'immagine presa in considerazione
58
59

```

Figura 7.2: Codice Matlab per selezionare l'area di interesse

L'ultima parte del codice comprende tutte le operazioni da effettuare sulla matrice di Co-Occorrenza per l'estrapolazione dei parametri utili all'analisi (Fig. 7.3).

La prima parte di questo blocco contiene le operazioni di creazione della matrice GLCM. A tale proposito, N indica il numero di toni di grigio, l'offset le direzioni in cui si vuole scansionare l'immagine e Z contiene i valori da prendere per creare la matrice.

La seconda parte comprende le operazioni di estrazione dei parametri di contrasto, omogeneità, correlazione ed entropia. Infine, si trova il comando per il salvataggio dei dati estrapolati.

```

60 %% GLCM
61 N=28; % toni di grigio
62 offsets=[0 1; -1 1; -1 0; -1 -1]; % direzioni di scansione 0°, 45° 90° 135°
63 [glcm,SI] = graycomatrix(Z, 'NumLevels',N, 'G', [], 'offset',offsets); %costruzione della GLCM
64
65 stats=graycoprops(glcm); %estraggo i diversi indici presi in considerazione
66 % for i=1:4
67 % Contrasto(1,i)=stats.Contrast(1,i)/(size(glcm,1)-1);
68 % end
69 Contrasto=mean(stats.Contrast);
70 Omogeneita=mean(stats.Homogeneity);
71 Correlazione=mean(stats.Correlation);
72
73 GLCMProb = glcm./sum(glcm(:)); %matrice GLCM scritta con i valori di probabilità
74 Entropy = sum(sum(-GLCMProb .* log10(GLCMProb+0.00001)));
75 Entropia=mean(Entropy);
76
77 %% Salvataggio dati
78
79 save('T06101IR.mat', 'stats', 'Entropy', 'Entropia', 'Contrasto', 'Omogeneita', 'Correlazione');
80

```

Figura 7.3: Codice Matlab per l'estrapolazione dei parametri

Attraverso tutti questi blocchi è possibile estrapolare i parametri descritti nel paragrafo 6.4.

7.2 Valutazione grafica dei parametri

In questo paragrafo vengono presentati gli andamenti dei parametri estrapolati dalla matrice di Co-Occorrenza che permettono di valutare la distribuzione della temperatura sugli schienali degli zaini.

I grafici presenti in questa sezione sono stati ottenuti effettuando una media aritmetica su tutti gli angoli di scansione, per quanto riguarda l'andamento dei parametri analizzati al variare del tempo di acquisizione, e sui tre intervalli di campionamento per i diversi modelli di zaino al fine di valutare l'andamento medio dei parametri per i quattro angoli di scansione 0°, 45°, 90° e 135°. Analizzando i trend in Fig. 7.4, ottenuti effettuando una media aritmetica su tutti i modelli di zaino utilizzati nei test, è possibile osservare come i parametri rilevati con il metodo della matrice GLCM presentano delle variazioni significative al variare dell'intervallo di campionamento e dell'angolo di scansione:

- L'andamento decrescente del contrasto tra tempo T50 e tempo T55, è dovuto al fatto che appena tolto lo zaino, le transizioni cromatiche sullo schienale sono maggiori, a causa dei punti di appoggio molto caldi rispetto alle zone in cui non c'è contatto tra corpo e zaino, Il contrasto rimane piuttosto stabile tra tempo T55 e tempo T60;

- L'omogeneità aumenta a T55, indice di una distribuzione di temperatura più uniforme sulla superficie dello schienale, per poi rimanere stabile tra tempo T55 e tempo T60. Questo comportamento è spiegato dal fatto che in questo intervallo di tempo la temperatura tende ad abbassarsi fino ad arrivare in equilibrio con la temperatura ambiente;
- L'entropia diminuisce denotando un grado di disordine minore al tempo T55 questo è dovuto al fatto che la temperatura col passare del tempo tende ad uniformarsi diminuendo il numero di transizioni;
- L'andamento crescente della correlazione all'aumentare del tempo di acquisizione denota una migliore distribuzione di temperatura in quanto la temperatura sullo schienale tende a portarsi ai valori di temperatura ambiente e quindi l'immagine presenta dei livelli di grigio più costanti.

Andando ad analizzare i valori dei parametri per i diversi modelli di zaino al variare del tempo di acquisizione (Fig. 7.5), si può osservare che, per tutti gli zaini, il contrasto e l'entropia si riducono tra tempo T50 e tempo T55, mentre rimangono stabili tra tempo T55 e tempo T60. Comportamento opposto, come ci si aspetta, si osserva per l'omogeneità e la correlazione in cui tutti i modelli di zaino presentano dei valori superiori a tempo T55 rispetto a tempo T50, e stabili tra tempo T55 e tempo T60. Osservando i grafici in Fig. 7.6, in cui vengono riportati i valori dei parametri analizzati per tutti i modelli di zaino al variare dell'angolo di scansione, è evidente come l'angolo 90° ha valori inferiori di contrasto ed entropia mentre gli angoli 45° e 135° presentano i valori più elevati. Come per la fig. 7.5 anche in questo caso si osserva un andamento opposto dei valori degli angoli per l'omogeneità e correlazione che presentano i valori più elevati a 90° e quelli minori a 45° e 135°.

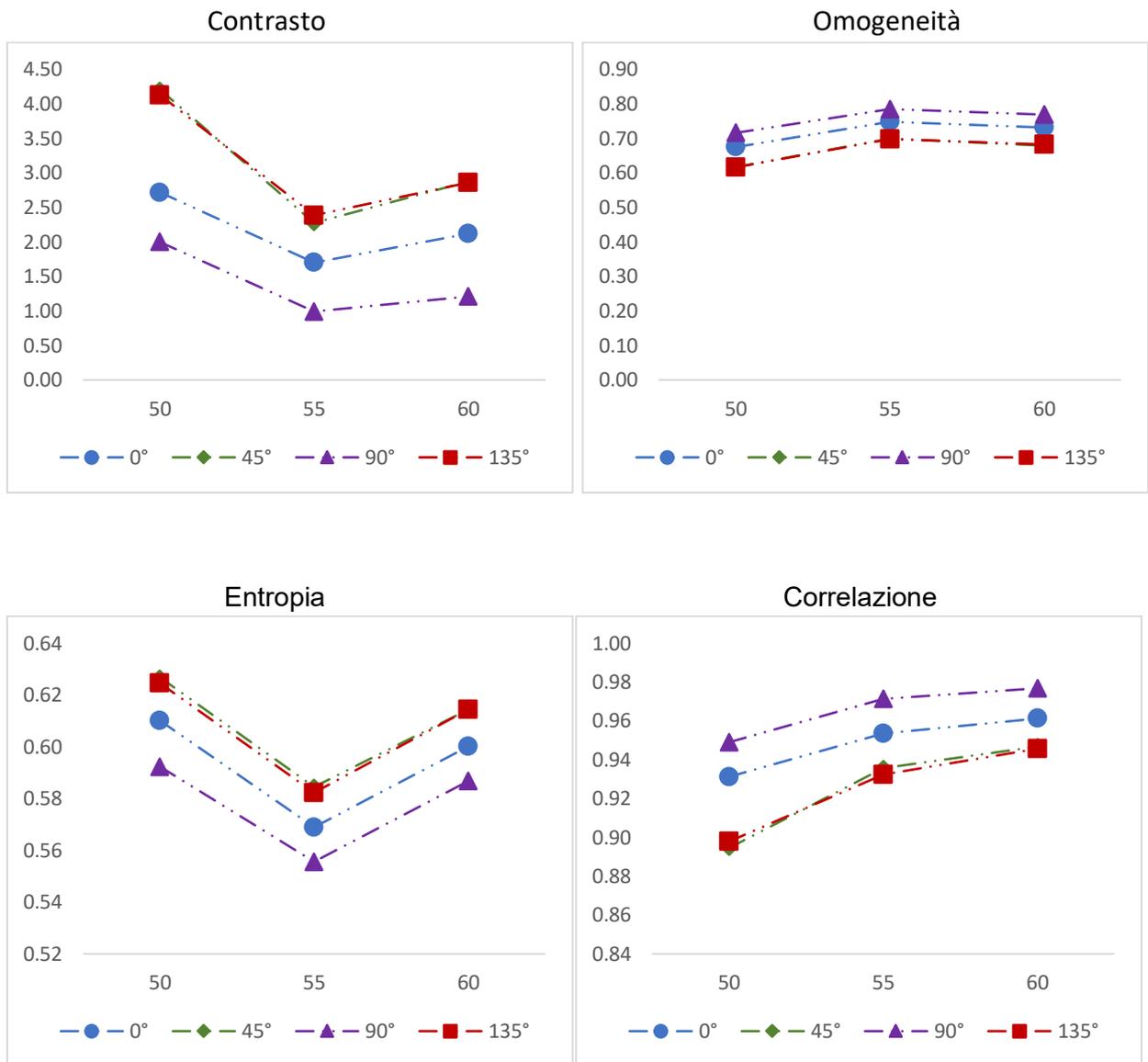
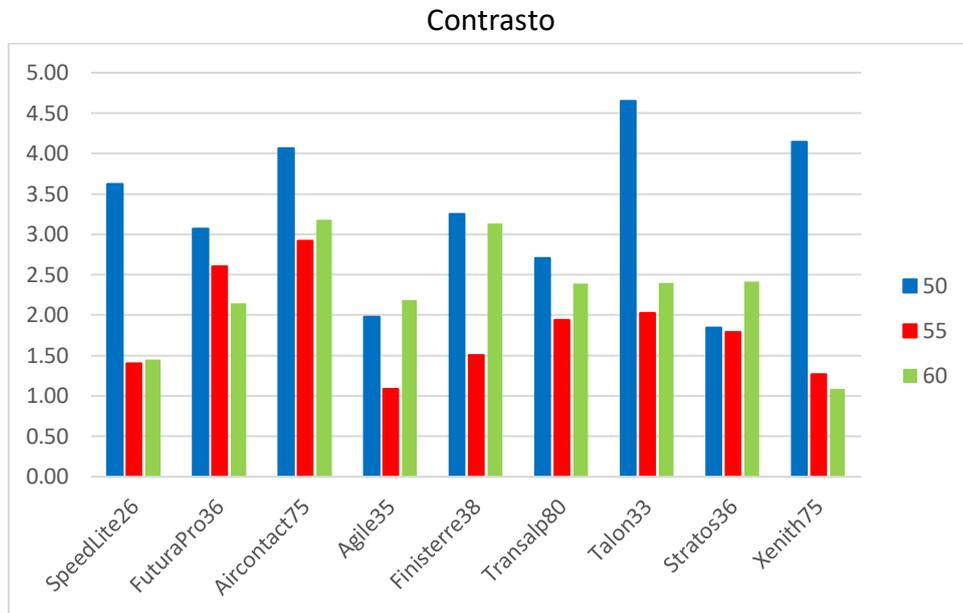
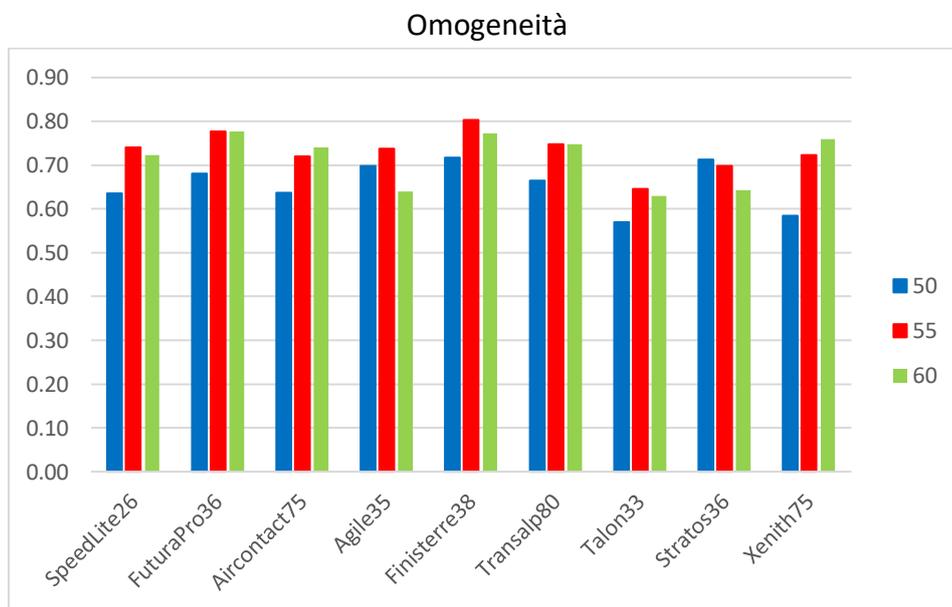


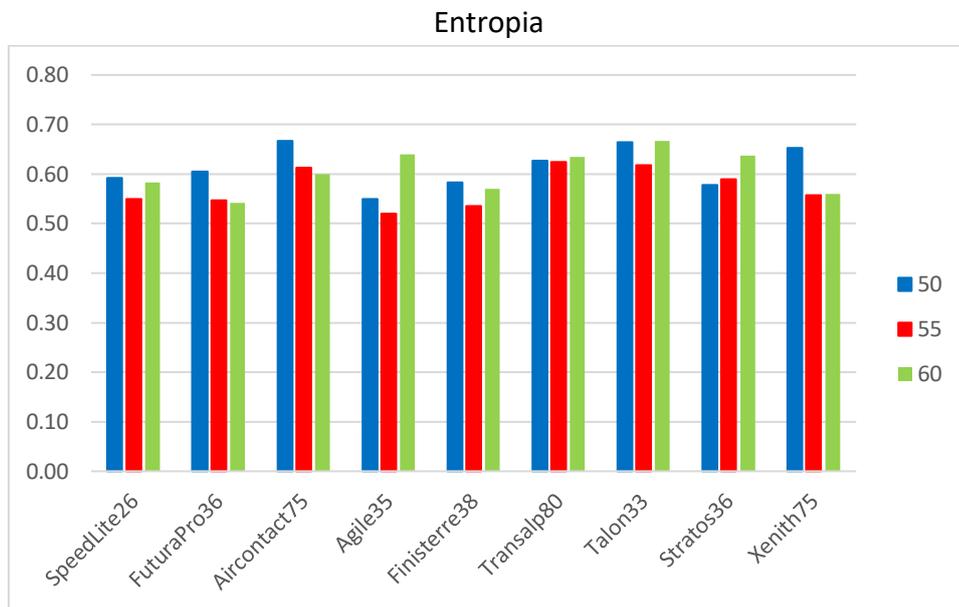
Figura 7.4: Il grafico mostra la relazione tra l'angolo di scansione, riportato come media aritmetica degli zaini utilizzati nei test, e il tempo di acquisizione per ognuno dei parametri ottenuti con il metodo della GLCM.



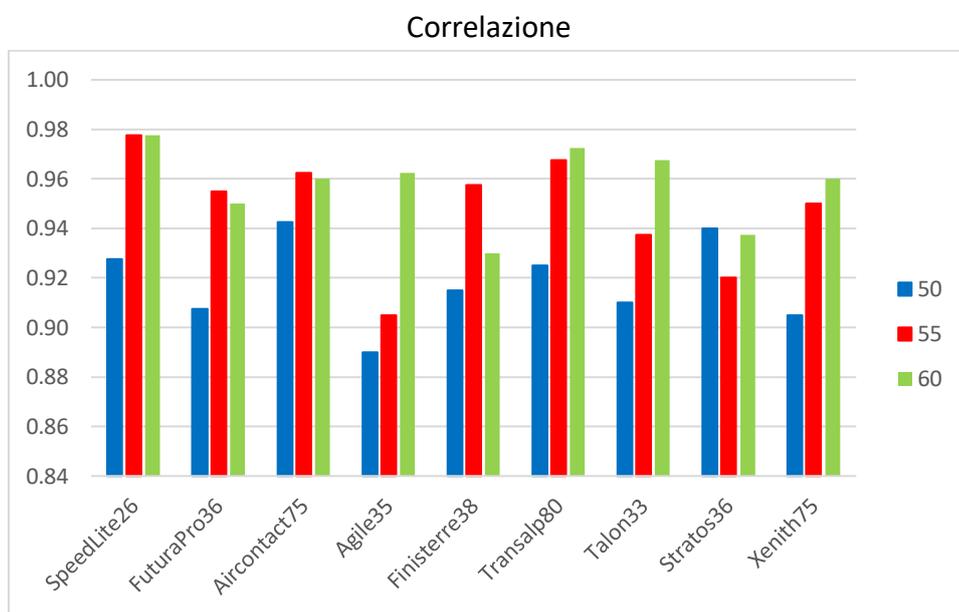
(a)



(b)

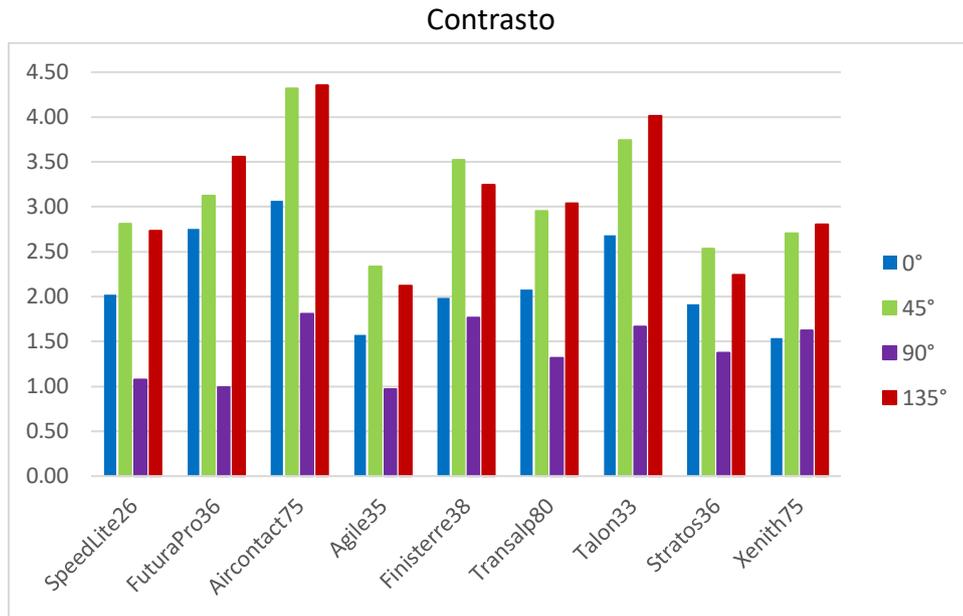


(c)

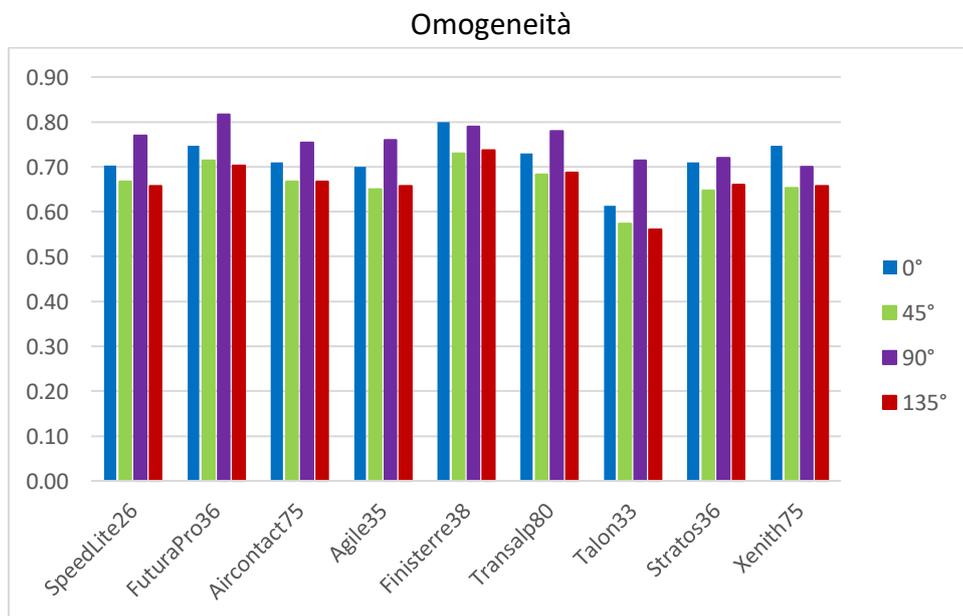


(d)

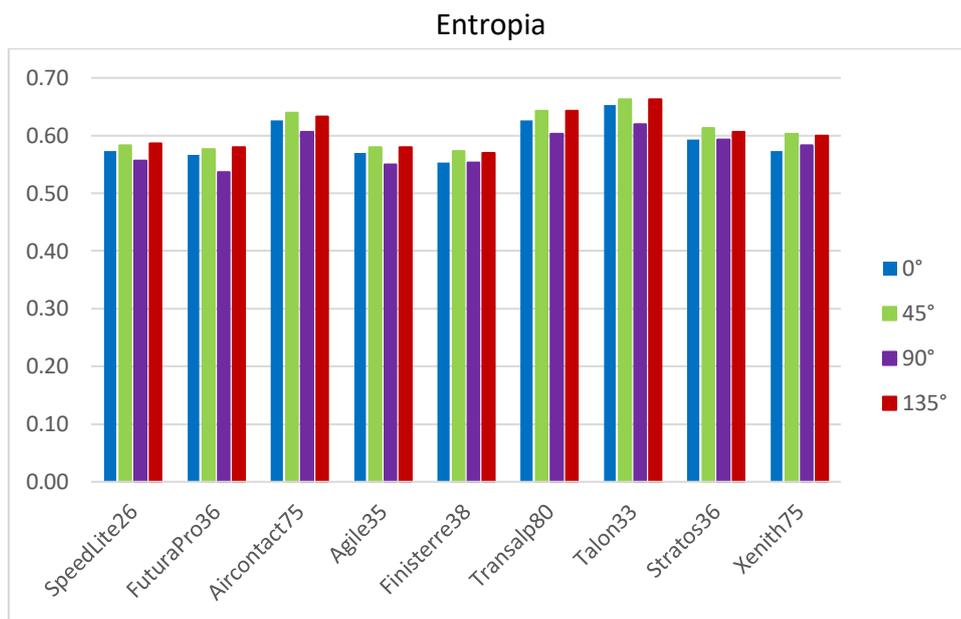
Figura 7.5: Il grafico mostra i valori dei parametri ottenuti confrontando i modelli di zaino per i tempi T50, T55, T60. Nello specifico vengono mostrati i valori di: (a) Contrasto, (b) Omogeneità, (c) Entropia e (d) Correlazione.



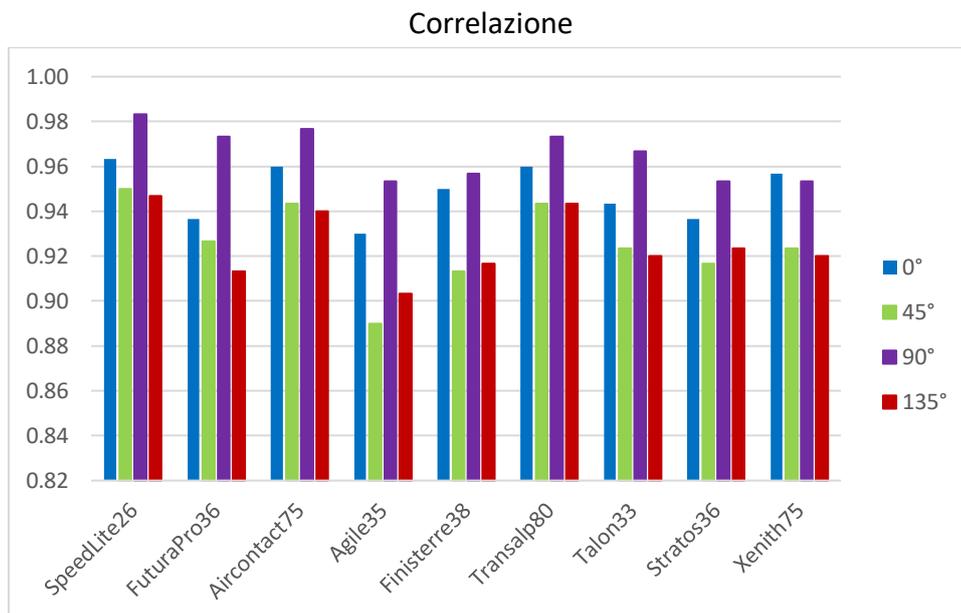
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.6: Il grafico mostra i valori dei parametri ottenuti confrontando i modelli di zaino per gli angoli di scansione 0°, 45°, 90° e 135°. Nello specifico vengono mostrati i valori di: (a) Contrasto, (b) Omogeneità, (c) Entropia e (d) Correlazione.

7.3 Analisi statistica

Test di Kruskal-Wallis e p-value. Il test di Kruskal-Wallis, utilizzato nel corso di questa indagine, è un test statistico di tipo non parametrico che ha lo scopo di verificare l'uguaglianza delle mediane di diversi gruppi; cioè per verificare che tali gruppi provengano da una stessa popolazione (o da popolazioni con uguale mediana). Si tratta del corrispondente non parametrico dell'analisi di varianza in cui i dati sono sostituiti dal loro rango, e viene solitamente usato quando non può essere assunta una distribuzione normale della popolazione.

Fissata come ipotesi nulla che i ranghi medi dei gruppi siano uguali, il p-value esprime la probabilità che la caratteristica oggetto dell'ipotesi nulla sia uguale per tutti i campioni analizzati oppure che almeno uno dei campioni sia differente. Convenzionalmente, valori di p-value $\geq 0,05$ portano ad accettare l'ipotesi nulla e si dice che eventuali differenze nei dati non sono statisticamente significative. Al contrario, se p-value $< 0,05$, si esclude l'ipotesi nulla e le differenze ottenute sono:

1. Statisticamente significative se $0,01 \leq \text{p-value} < 0,05$
2. Molto significative se $0,001 \leq \text{p-value} < 0,01$
3. Estremamente significative se $\text{p-value} < 0,001$

Applicazione al caso in esame. L'analisi statistica condotta può essere suddivisa in due fasi: nella prima parte, per ogni parametro, sono stati ricavati i valori di p-value (Tab. 7.1), andando ad analizzare quattro casi differenti:

1. Analisi su tutti gli zaini prendendo in considerazione tutti gli angoli e i tempi;
2. Analisi su tutti gli angoli prendendo in considerazione ogni zaino a ogni intervallo di campionamento;
3. Analisi su tutti gli intervalli di campionamento prendendo in considerazione ogni zaino e ogni angolo;
4. Analisi su tutti gli zaini su tutti i tempi prendendo in considerazione i valori per singoli angoli di scansione.

Nella seconda parte, per i parametri che presentano un valore di p-value < 0.05 , viene effettuato un test post-hoc, Tukey-Kramer, per indagare, per i diversi parametri presi in considerazione, quali zaini presentino una differenza statisticamente significativa all'interno dei quattro casi presi in esame.

	Contrasto	Omogeneità	Entropia	Correlazione
Valore p-value caso 1	0.0312*	0.0003***	0.000***	0.0237*
Valore p-value caso 2	0.0000***	0.0000***	0.0664	0.0000***
Valore p-value caso 3	0.0000***	0.0000***	0.0005**	0.0000***
Valore p-value caso 4 (0°)	0.3017	0.0558	0.1100	0.5400
Valore p-value caso 4 (45°)	0.5669	0.2182	0.1128	0.5566
Valore p-value caso 4 (90°)	0.3745	0.1934	0.0973	0.2656
Valore p-value caso 4 (135°)	0.2794	0.1826	0.1303	0.6740

Tabella 7.1: Tabella contenente i p-value calcolati per gli indici estrapolati dalla GLCM per i diversi casi esaminati. I p-value inferiori alla soglia di significatività (< 0.05) sono indicati con (significativi, ** molto significativi, *** estremamente significativi).*

Dall'analisi effettuata con il test post-hoc è possibile ottenere le seguenti informazioni:

- Quali sono i modelli di zaino che presentano delle differenze significative a seconda del parametro considerato;
- L'influenza dell'angolo di scansione e dell'intervallo di campionamento sui diversi parametri presi in considerazione a seconda del modello preso in esame.

Andando a considerare il primo caso preso in esame, è emerso che, a seconda dell'indice estrapolato dalla matrice GLCM, diversi modelli di zaino presentano delle differenze significative (Tab. 7.2).

Analizzando i dati ottenuti dal test post-hoc per il secondo e terzo caso, si può osservare come gli angoli di scansione e gli intervalli di campionamento presentino delle differenze significative al variare del parametro considerato (Tab. 7.3 e 7.4).

	Contrasto	Omogeneità	Entropia	Correlazione
SpeedLite26	---	Talon33	Aircontact75 Transalp80 Talon33	Agile35
FuturaPro36	---	Talon33	Aircontact75 Transalp80 Talon33	---
Aircontact75	Agile 35	Talon33	SpeedLite26 FuturaPro36 Agile35 Finisterre38	---
Agile35	Aircontact75	---	Aircontact75 Transalp80 Talon33	SpeedLite26
Finisterre38	---	Talon33	Aircontact75 Transalp80 Talon33	---
Transalp80	---	Talon33	Speedlite26 FuturaPro36 Agile35 Finisterre38	---
Talon33	---	SpeedLite26 FuturaPro36 Aircontact75 Finisterre38 Transalp80	Speedlite26 FuturaPro36 Agile35 Finisterre38 Stratos36 Xenith75	---
Stratos36	---	---	Talon33	---
Xenith75	---	---	Talon33	---

Tabella 7.2: Differenze significative tra i diversi modelli di zaino a seconda del parametro considerato

	Contrasto	Omogeneità	Correlazione
0°	90°	45° 135°	0°
45°	90°	0° 90°	90°
90°	0° 45° 135°	45° 135°	45° 135°
135°	90°	0° 90°	0° 90°

Tabella 7.3: Differenze significative tra i diversi angoli di scansione a seconda del parametro considerato

	Contrasto	Omogeneità	Entropia	Correlazione
50	55 60	55 60	55	55 60
55	50	50	50 60	50
60	50	50	55	50

Tabella 7.4: Differenze significative tra i diversi intervalli di campionamento a seconda del parametro considerato

7.4 Conclusioni

Questo lavoro di tesi consiste nell'elaborazione di immagini termografiche a infrarossi per l'estrapolare di parametri in grado di valutare la distribuzione delle temperature superficiale negli schienali degli zaini. Il metodo scelto per l'elaborazione delle immagini è basato sull'utilizzo della matrice di Co-Occorrenza da cui vengono estrapolati gli indici di contrasto, omogeneità, entropia e correlazione. Il lavoro di questa tesi, svolto nell'ambito di un progetto di ricerca in collaborazione con un'azienda italiana di attrezzatura e abbigliamento per la montagna, condotto presso il laboratorio LATT del Politecnico di Torino a Biella, ha l'obiettivo di valutare gli effetti del trasporto di zaini da montagna sul comfort termico ed ergonomico.

Dallo studio condotto sono scaturiti diversi risultati. Da un punto di vista procedurale è stato definito un protocollo sperimentale ottimale per garantire la ripetibilità e riproducibilità delle misurazioni e viene presentato un protocollo di gestione ed analisi delle immagini termografiche. Ai fini dell'indagine, è stato programmato un algoritmo in ambiente Matlab per la gestione delle immagini e selezione delle regioni di interesse in modo automatico, e per l'elaborazione dei parametri necessari alla valutazione quantitativa delle immagini stesse. Inoltre, una volta ottenuto il set di dati per tutti gli zaini, oltre a valutare la distribuzione della temperatura superficiale lungo gli schienali, si è proceduto a valutare le possibili correlazioni tra gli zaini a seconda dei parametri selezionati. Valutando il livello di significatività con il test statistico di Kruskal-Wallis, è emerso che alcuni indici estrapolati dall'applicazione del metodo della matrice GLCM presentano delle variazioni statisticamente significative, per cui, su questi indici è stato effettuato un test post-hoc, Tukey-Kramer, per indagare quali zaini presentino delle differenze statisticamente significative al variare dei parametri presi in esame. Dai dati ottenuti è emerso che tutti gli zaini presentano un aumento dell'omogeneità nella distribuzione della temperatura lungo lo schienale all'aumentare del tempo di acquisizione delle immagini e che questi valori dipendono fortemente dall'angolo di scansione dell'immagine. A tale proposito i valori più elevati si hanno per un angolo di 90°, quindi per una scansione verticale dell'immagine, mentre i valori minimi sono osservabili nelle due direzioni diagonali di scansione. Gli indicatori ottenuti con il metodo della GLCM si sono dimostrati particolarmente utili nel supportare le osservazioni fatte guardando le immagini termografiche. Andando a valutare l'andamento di questi parametri è stato evidenziato il fatto che una volta tolto lo zaino (T50) il range di temperatura misurato sullo schienale sia superiore rispetto alle misurazioni effettuate ai tempi successivi in cui la temperatura tende a stabilizzarsi su valori prossimi a quelli ambiente per effetto del raffreddamento dovuto all'allontanamento dalla fonte di calore (il corpo) e all'evaporazione del sudore.

L'applicazione del metodo della matrice GLCM sugli schienali degli zaini ha permesso di evidenziare quali zaini consentono una migliore percezione del comfort termico. Questa sensazione può essere associata sia ai livelli di temperatura raggiunti dallo schienale, parametro che può essere indagato tramite l'analisi dei valori di contrasto, sia al modo in cui si distribuisce la temperatura lungo lo schienale, parametro che viene valutato tramite l'analisi dei valori di omogeneità. Tra tutti gli zaini utilizzati per i test, quelli Ferrino (Agile35,

Finisterre38 e Transalp80) presentano i valori di contrasto inferiori e quelli di omogeneità superiori, per questo motivo possono essere considerati gli zaini che garantiscono le migliori prestazioni a livello di temperatura superficiale e di conseguenza quelli che permettono una percezione di comfort termico migliore.

Indice delle Figure

Figura 3.1: Rappresentazione grafica del PMV	13
Figura 3.2: Relazione PMV-PPD	13
Figura 4.1: Spettro elettromagnetico [47].....	16
Figura 4.2 Immagini termografiche degli pneumatici di un'auto da corsa [47]	19
Figura 4.3: Immagine termografica del telaio di una bicicletta [47]	19
Figura 4.4: Immagine termografica della distribuzione di temperatura del tessuto (fronte e retro) [48].	20
Figura 5.1: (a) Vista laterale della posizione dello schienale e degli spallacci a contatto con il corpo. (b) Vista laterale della posizione della cintura pelvica.....	23
Figura 5.2: (a) Posizionamento sensori di pressione in configurazione zaino aperto. (b) Posizionamento sensori di pressione in configurazione zaino chiuso (anteriormente a sinistra e posteriormente a destra).	24
Figura 5.3: Soggetto prima dell'inizio del test.	26
Figura 6.1: Immagine schienale zaino in scala di grigio.....	28
Figura 6.2: Nell'immagine viene visualizza l'interfaccia grafica nella quale è possibile selezionare l'area d'interesse.....	30
Figura 6.3: L'immagine mostra l'area selezionata tramite il rettangolo	30
Figura 6.4: Matrice con toni di grigio	31
Figura 6.5: Matrice con valori numerici corrispondenti	32
Figura 6.6: Direzione scansione matrice GLCM [49]	33
Figura 6.7: GLCM Fig. 6.4.....	33
Figura 6.8: GLCM espressa in termini di probabilità	34
Figura 6.9: Quadrato bianco su sfondo nero.....	40
Figura 6.10: (a) la superficie del quadrato bianco in Fig.4.6 viene dispersa sullo sfondo nero. (b) Confronto andamento dei parametri per i due casi.	41
Figura 6.11: Immagine sfumata con valori di grigio crescenti su 256 livelli.....	41
Figura 6.12: I seguenti andamenti sono stati ricavati fissando una direzione di scansione $\theta = 0^\circ$	42
Figura 6.13: Andamento di Contrasto, Correlazione, Omogeneità ed Entropia al variare della direzione di scansione θ	42
Figura 7.1: Codice Matlab per lavorare su immagini termografiche.....	44
Figura 7.2: Codice Matlab per selezionare l'area di interesse	45
Figura 7.3: Codice Matlab per l'estrapolazione dei parametri	46
Figura 7.4: Il grafico mostra la relazione tra l'angolo di scansione, riportato come media aritmetica degli zaini utilizzati nei test, e il tempo di acquisizione per ognuno dei parametri ottenuti con il metodo della GLCM.....	48
Figura 7.5: Il grafico mostra i valori dei parametri ottenuti confrontando i modelli di zaino per i tempi T50, T55, T60. Nello specifico vengono mostrati i valori di: (a) Contrasto, (b) Omogeneità, (c) Entropia e (d) Correlazione.	50
Figura 7.6: Il grafico mostra i valori dei parametri ottenuti confrontando i modelli di zaino per gli angoli di scansione 0° , 45° , 90° e 135° . Nello specifico vengono mostrati i valori di: (a) Contrasto, (b) Omogeneità, (c) Entropia e (d) Correlazione.	52

Indice delle tabelle

Tabella 5.1: Posizionamento marker, sensori inerziali e di temperatura nel copro e nello zaino	25
Tabella 7.1: Tabella contenente i p-value calcolati per gli indici estrapolati dalla GLCM per i diversi casi esaminati. I p-value inferiori alla soglia di significatività (< 0.05) sono indicati con (* significativi, ** molto significativi, *** estremamente significativi).....	54
Tabella 7.2: Differenze significative tra i diversi modelli di zaino a seconda del parametro considerato.....	55
Tabella 7.3: Differenze significative tra i diversi angoli di scansione a seconda del parametro considerato	56
Tabella 7.4: Differenze significative tra i diversi intervalli di campionamento a seconda del parametro considerato	56

Bibliografia

- [1] Genitrini, M., Dotti, F., & Ferri, A. (s.d.). *Impact of load carriage packs over ergonomics: Physiological and psychological effects. A systematic review*. 29. Under review.
- [2] Hardie, R., Haskew, R., Harris, J., & Hughes, G. (2015). The effects of bag style on muscle activity of the trapezius, erector spinae and latissimus dorsi during walking in female university students. *Journal of Human Kinetics*, 45(1), 39–47.
- [3] Jacobson, B. H., Cook, D. A., Altena, T. S., Gemmell, H. A., & Hayes, B. M. (2003). Comparison of perceived comfort differences between standard and experimental load carriage systems. *Ergonomics*, 46(10), 1035–1041.
- [4] Abdelraouf, O. R., Hamada, H. A., Selim, A., Shendy, W., & Zakaria, H. (2016). Effect of backpack shoulder straps length on cervical posture and upper trapezius pressure pain threshold. *Journal of Physical Therapy Science*, 28(9), 2437–2440.
- [5] LaFiandra, M., Wagenaar, R. C., Holt, K., & Obusek, J. (2003). How do load carriage and walking speed influence trunk coordination and stride parameters *Journal of biomechanics*, 36 (1), 87–95.
- [6] Simpson, K. M., Munro, B. J., & Steele, J. R. (2011). Backpack load affects lower limb muscle activity patterns of female hikers during prolonged load carriage. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21 (5), 782–788.
- [7] Dahl, K. D., Wang, H., Popp, J. K., & Dickin, D. C. (2016). Load distribution and postural changes in young adults when wearing a traditional backpack versus the backpack. *Gait & posture*, 45, 90–96.
- [8] Devroey, C., Jonkers, I., De Becker, A., Lenaerts, G., & Spaepen, A. (2007). Evaluation of the effect of backpack load and position during standing and walking using biomechanical, physiological and subjective measures. *Ergonomics*, 50 (5), 728–742.
- [9] Golriz, S., Hebert, J. J., Foreman, K. B., & Walker, B. F. (2015). The effect of hip belt use and load placement in a backpack on postural stability and perceived exertion: a within-subjects trial. *Ergonomics*, 58 (1), 140–147.
- [10] Caron, R. R., Wagenaar, R. C., Lewis, C. L., Saltzman, E., & Holt, K. G. (2013). Center of mass trajectory and orientation to ankle and knee in sagittal plane is maintained with forward lean when backpack load changes during treadmill walking. *Journal of biomechanics*, 46 (1), 70–76.
- [11] Rosa, R. G. d., Gome~nuka, N. A., Oliveira, H. B. d., & Peyr'e-Tartaruga, L. A. (2018). Inclined weight-loaded walking at different speeds: pelvis-shoulder coordination, trunk movements and cost of transport. *Journal of motor behavior*, 50 (1), 73–79.

- [12] Daffin, L., Stuelcken, M. C., Armitage, J., & Sayers, M. G. (2020). The effect of backpack load position on photographic measures of craniovertebral posture in 150 asymptomatic young adults. *Work* (Preprint), 1–8.
- [13] Sharpe, S., Holt, K., Saltzman, E., & Wagenaar, R. (2008). Effects of a hip belt on transverse plane trunk coordination and stability during load carriage. *Journal of biomechanics*, 41 (5), 968–976.
- [14] Li, S. S., & Chow, D. H. (2016). Multi-objective analysis for assessing simultaneous changes in regional spinal curvatures under backpack carriage in young adults. *Ergonomics*, 59 (11), 1494–1504.
- [15] In, T.-s., Yu, S.-m., & Jang, S.-h. (2019). The effects of force that pushes forward lumbar region on sagittal spinal alignment when wearing backpack. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (19), 3643
- [16] Lee, J., Yoon, Y.-J., & Shin, C. S. (2017). The effect of backpack load carriage on the kinetics and kinematics of ankle and knee joints during uphill walking. *Journal of applied biomechanics*, 33 (6), 397–405.
- [17] Mallakzadeh, M., Javidi, M., Azimi, S., & Monshizadeh, H. (2016). Analyzing the potential benefits of using a backpack with non-flexible straps. *Work*, 54 (1), 11–20.
- [18] Li, S. S., Zheng, Y.-P., & Chow, D. H. (2019). Changes of lumbosacral joint compression force profile when walking caused by backpack loads. *Human movement science*, 66, 164–172.
- [19] Majumdar, D., Pal, M. S., & Majumdar, D. (2010). Effects of military load carriage on kinematics of gait. *Ergonomics*, 53 (6), 782–791.
- [20] Grenier, J. G., Peyrot, N., Castells, J., Oullion, R., Messonnier, L., & Morin, J.-B. (2012). Energy cost and mechanical work of walking during load carriage in soldiers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44 (6), 1131–1140.
- [21] Tzu-wei, P. H., & Kuo, A. D. (2014). Mechanics and energetics of load carriage during human walking. *Journal of Experimental Biology*, 217 (4), 605–613.
- [22] Scheer, V., Cramer, L., & Heitkamp, H.-C. (2019). Running economy and energy cost of running with backpacks. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 59 (4), 555–560.
- [23] Kratzenstein, S., Wanstrath, M., & Behrenbruch, K. (2019). Height adjustments on backpackcarrying systems and muscle activity. *Applied ergonomics*, 74, 172–176.
- [24] Al-Khabbaz, Y. S., Shimada, T., & Hasegawa, M. (2008). The effect of backpack heaviness on trunk-lower extremity muscle activities and trunk posture. *Gait & posture*, 28 (2), 297–302.
- [25] Lindner, T., Schulze, C., Voitge, S., Finze, S., Mittelmeier, W., & Bader, R. (2012). The effect of the weight of equipment on muscle activity of the lower extremity in soldiers. *The Scientific World Journal*, 2012.

- [26] Ramspeck, C. B., Jakob, F. E., Kennedy, S. D., Knebel, D. E., Kohloss, F. H., McBride, M. F., Modera, M. P., Nasser, C. H., Shavit, G., Tree, D. R., Williams, T. H., Woods, J. E., Montgomery, R. D., & Peterson, K. W. (s.d.). *ASHRAE STANDARDS COMMITTEE 2003-2004*. 34.
- [27] Lin, Z., & Deng, S. (2008). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics-Developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*, 43(1), 70–81.
- [28] Mansi, S. A., Barone, G., Forzano, C., Pigliautile, I., Ferrara, M., Pisello, A. L., & Arnesano, M. (2021). Measuring human physiological indices for thermal comfort assessment through wearable devices: A review. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 183.
- [29] *ISO 7726:1998*, Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities.
- [30] *ISO 8996:2004*, Ergonomics of the thermal environment—Determination of metabolic rate.
- [31] *ISO 9920:2007*, Ergonomics of the thermal environment—Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble.
- [32] Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2626–2640.
- [33] Yao, Y., Lian, Z., Liu, W., Jiang, C., Liu, Y., & Lu, H. (2009). Heart rate variation and electroencephalograph—The potential physiological factors for thermal comfort study. *Indoor Air*, 19(2), 93–101.
- [34] Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., & Hardy, J. D. (1967). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 1(1), 1–20.
- [35] Yao, Y., Lian, Z., Liu, W., & Shen, Q. (2008). Experimental study on physiological responses and thermal comfort under various ambient temperatures. *Physiology and Behavior*, 93(1–2), 310–321.
- [36] Sim, J. K., Yoon, S., & Cho, Y.-H. (2018). Wearable sweat rate sensors for human thermal comfort monitoring. *Scientific Reports*, 8(1).
- [37] Son, Y. J., & Chun, C. (2018). Research on electroencephalogram to measure thermal pleasure in thermal alliesthesia in temperature step-change environment. *Indoor Air*, 28(6), 916–923.
- [38] Shan, X., & Yang, E.-H. (2020). Supervised machine learning of thermal comfort under different indoor temperatures using EEG measurements. *Energy and Buildings*, 225.

- [39] Wu, M., Li, H., & Qi, H. (2020). Using electroencephalogram to continuously discriminate feelings of personal thermal comfort between uncomfortably hot and comfortable environments. *Indoor Air*, 30(3), 534–543.
- [40] McCraty, R., & Shaffer, F. (2015). Heart rate variability: New perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk. *Global Advances In Health and Medicine*, 4(1), 46–61.
- [41] Rubinstein, E. H., & Sessler, D. I. (1990). Skin-surface temperature gradients correlate with fingertip blood flow in humans. *Anesthesiology*, 73(3), 541–545.
- [42] *ISO 7730:2005*, Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [43] Losi, G., Bonzanini, A., Aquino, A., & Poesio, P. (2021). Analysis of thermal comfort in a football stadium designed for hot and humid climates by CFD. *Journal of Building Engineering*, 33.
- [44] Cakó, B., Zoltán, E. S., Girán, J., Medvegy, G., Miklós, M. E., Nyers, Á., Grozdics, A. T., Kisander, Z., Bagdán, V., & Borsos, Á. (2021). An efficient method to compute thermal parameters of the comfort map using a decreased number of measurements. *Energies*, 14(18).
- [45] Priego Quesada, J. I., Salvador Palmer, R., & Cibrián Ortiz de Anda, R. M. (2017). Physics Principles of the Infrared Thermography and Human Thermoregulation. In J. I. Priego Quesada (A c. Di), *Application of Infrared Thermography in Sports Science* (pagg. 25–48).
- [46] Fernandes, A. de A., Amorim, P. R. dos S., Brito, C. J., de Moura, A. G., Moreira, D. G., Costa, C. M. A., Sillero-Quintana, M., & Marins, J. C. B. (2014). Measuring skin temperature before, during and after exercise: A comparison of thermocouples and infrared thermography. *Physiological Measurement*, 35(2), 189–203.
- [47] Quesada, J. I. P., & Carpes, F. P. (2019). Application of infrared thermography in the assessment of sport equipment. In *Materials in Sports Equipment* (pagg. 37–69).
- [48] Zhang, Z., Li, J., & Wang, Y. (2015). Improving garment thermal insulation property by combining two non-contact measuring tools. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 40(4), 392–398.
- [49] Huang, H., Liu, L., Ngadi, M. O., & Gariépy, C. (2014). Rapid and non-invasive quantification of intramuscular fat content of intact pork cuts. *Talanta*, 119, 385–395.