



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria e Scienza dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria dell'Informazione e delle Comunicazioni

ELABORATO FINALE

ANALISI DEL COLPO DI UNA PALLINA DA
TENNIS

Modello biomeccanico ed analisi computerizzata

Supervisore
De Natale Francesco
Co-supervisore
Rosani Andrea

Laureando
Chierchia Remì [192874]

Anno accademico 2019/2020

Ringraziamenti

...thanks to...

Indice

Sommario	2
1 Introduzione all'analisi del fenomeno biomeccanico	2
1.1 La battuta	2
1.2 Il dritto e il rovescio	3
1.3 Gli effetti	4
2 Modello fisico	6
2.1 Fisica della pallina	7
2.2 Fisica della racchetta	7
2.3 Fisica del giocatore	8
2.4 Fisica dell'impatto	12
3 Analisi del fenomeno con OpenPose	13
3.1 Premesse iniziali	13
3.2 OpenPose ed OpenCV	13
3.3 Tecniche e teoria dell'elaborazione delle immagini utilizzate	14
3.3.1 Introduzione alle immagini digitali	14
3.3.2 Tecniche di pre-processing	15
3.3.3 Filtri digitali	16
3.3.4 Estrazione di contorni	16
3.4 Svolgimento e problematiche generali	17
3.5 Risultati	21
Conclusioni	23
Bibliografia	24
Sitografia	26

Sommario

In questo report verrà affrontata l'analisi del colpo di una pallina da tennis. Verranno analizzati i vari tipi di colpi ed effetti che il sistema giocatore più racchetta può generare. Si cercherà di modellizzare il fenomeno fisico con adeguate considerazioni sulla complessità e sulla realisticità del risultato ottenibile. A seguito del modello fisico verranno applicate tutte le cosiderazioni effettuate in antecedenza per un'analisi computerizzata del fenomeno. Quest'ultima verrà affrontata attraverso la programmazione di un apposito software in linguaggio python. Questo programma estrapolerà da un video raffigurante situazioni differenti, delle informazioni riguardanti l'interazione giocatore-pallina, e quali risultati vengono generati in termini di forza e velocità. In conclusione verrano considerate delle soluzioni per cercare di migliorare l'efficienza e l'efficacia con cui un giocatore di tennis può colpire la pallina per ottenere l'effetto desiderato.

1 Introduzione all'analisi del fenomeno biomeccanico

L'analisi del movimento di un giocatore di tennis è utile per ottenere una molteplicità di informazioni che non si otterrebbero in altro modo. Queste informazioni sono fondamentali per vari scopi, tra cui l'analisi della postura da parte di un allenatore, la prevenzione dagli infortuni, e come in questo caso l'analisi delle forze e le loro scomposizioni nei vari contributi muscolari e articolari per determinare l'efficienza maggiore possibile in ogni singolo colpo.

Durante una partita di tennis, l'energia scambiata è sia di tipo cinetica che potenziale. In particolare, l'energia potenziale comprende anche l'energia elastica provocata da corpi elasticci come la pallina e la rete della racchetta, oppure dalla deformazione di corpi solidi e fluidi. L'equivalente umano avrebbe energia conservata nei muscoli e tensione data dai tendini. L'energia cinetica, invece, viene considerata come il lavoro che serve per colpire la pallina e cambiarne la sua velocità.

1.1 La battuta

La battuta, o il servizio, è considerata il movimento più stressante fisicamente per un giocatore di tennis. Le strutture come articolazioni e legamenti vengono sottoposte ad un alti carichi di compressione, rotazione e trazione, anche simultaneamente, principalmente di tipo eccentrico. Questo tipo di movimento è anche la principale causa di infortunio dell'atleta, che sovradosando oppure non eseguendo in modo corretto il movimento, genera infiammazioni, oppure nei casi più gravi stiramenti o strappi di muscoli e tendini.

Si può suddividere la battuta in otto sequenze e tre macro fasi. La prima è la fase di preparazione e comprende:

- inizio, dove il giocatore assume la posizione personalizzata per la battuta;
- alzata, dove con la mano non di servizio il giocatore lancia la palla in aria, mentre la racchetta è ancora in una posizione di riposo;
- caricamento, dove l'atleta piega le ginocchia, ruota busto e spalle e porta il gomito nella posizione verticale più bassa con la racchetta rivolta verso l'alto;

- armamento, l'atleta si spinge con l'aiuto delle gambe verso l'alto e porta la racchetta dietro la testa con una rotazione massima della spalla e con la linea gomito-polso che assume una posizione parallela al terreno, questa è la posizione di carica massima.

La seconda fase si chiama di accelerazione e si suddivide in:

- accelerazione, in questa sequenza il giocatore rilascia la rotazione della spalla e del busto, e spinge la racchetta lungo una traiettoria segmento circolare, facendole assumere un notevole momento, i giocatori professionisti riescono a muovere la racchetta tra i 38 e i 47 m/s^2 ;
- contatto, dove avviene il vero e proprio contatto con la pallina, mentre i muscoli stabilizzatori di spalla, polso e gomito contrastano la forza opposta all'impatto.

La terza e ultima fase si divide in:

- decelerazione, dove l'atleta ferma la rotazione della spalla e del gomito, questa è la sequenza più stressante nel servizio, la forza di decelerazione può arrivare ad assumere valori superiori ai 300 N * m ;
- fine, dove l'atleta dissipà tutta l'energia prodotta con l'aiuto delle gambe a terra.

Nell'immagine 1.1 si può notare la rappresentazione grafica delle sequenze appena descritte. [4] [8]

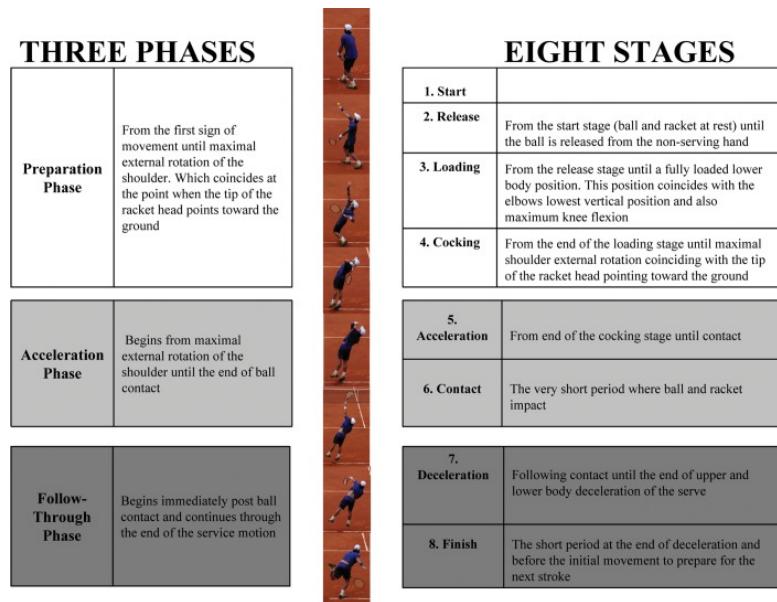


Figura 1.1: Figura rappresentante le otto fasi della battuta - Fonte: [8]

1.2 Il dritto e il rovescio

Durante i momenti appena precedenti ad un colpo di dritto i piedi sono orientati paralleli o in direzioni diverse, spalle e busto sono ruotate approssimativamente di 45 gradi e segue una flessione delle ginocchia. La racchetta viene portata all'indietro sopra al livello della testa. L'energia potenziale che si crea, viene liberata con un movimento ad arco discendente, insieme all'energia elastica conservata nei muscoli e nella torsione del busto. Nel rilascio della torsione, che coincide con l'impatto, la gamba mantenuta posteriore si estende per sostenere il colpo. In questo movimento non è richiesta una grande stretta della racchetta, poiché il momento che acquisisce quest'ultima svolge gran parte dello sforzo. Dopo il colpo, il corpo è quasi completamente esteso e scarico da tensioni rotazionali, in questo momento, la rotazione della racchetta viene rallentata fino ad esaurirsi. Molti giocatori professionisti, in queste fasi, si elevano da terra dalla potenza e dalla velocità con cui si estendono.

Il colpo rovescio avviene analogamente. Ciò che distingue maggiormente questo tipo di colpo dal precedente è il modo con cui gli arti superiori dell'atleta interagiscono con il movimento. La leva

spalla-racchetta, infatti, è più sfavorevole in questo caso, dato che il braccio non compie un percorso così ampio come nel dritto. Molti atleti preferiscono una presa doppia, cioè con entrambe le mani sulla racchetta, poiché viene sostenuto meglio il colpo, e quindi, l'atleta può imprimere più forza.

Nelle figure sottostanti vengono ritratti i due tipi di colpo appena illustrati, rispettivamente 1.2 e 1.3.



Figura 1.2: Figura rappresentante il colpo di dritto - Fonte: The Tennis Tribe



Figura 1.3: Figura rappresentante il colpo di rovescio - Fonte: Pro Tennis Tips

1.3 Gli effetti

Nel tennis, ma come in altri sport, oltre a colpire la palla per direzionarla nel campo avversario, si possono imprimere diversi effetti cambiando l'orientazione della racchetta e sfruttando l'attrito che si verifica al contatto. Si suddividono a sua volta in effetti in battuta e in risposta.

I principali effetti in battuta (figura 1.4):

- Kick o Topspin, il quale è caratterizzato da una forte rotazione della pallina, ma mediamente il più lento. Si esegue facendo scorrere la racchetta, al contatto con la pallina, internamente verso il braccio "debole" nel momento del contatto;
- Slice, questo effetto è opposto, come movimento, a quello di kick, infatti, si fa ruotare la racchetta verso l'esterno. Anche la direzione della pallina cambia, compiendo una arco opposto al primo effetto. La rotazione ottenibile è minore rispetto al primo caso ma ha velocità superiore.

- Flat, il classico colpo di dritto dove l'atleta si concentra maggiormente sulla forza con cui scaglia questo colpo, infatti, è il più veloce.

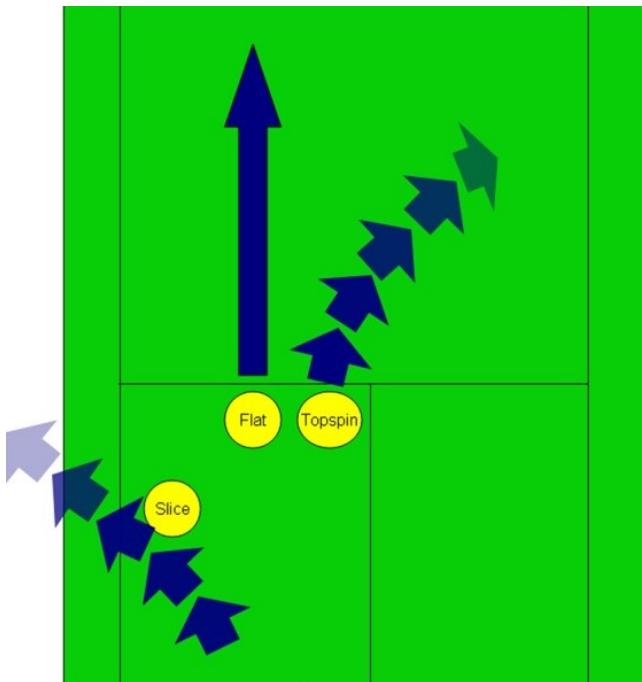


Figura 1.4: Figura rappresentante i principali effetti in battuta - Fonte: [8]

I principali effetti in risposta:

- Topspin, viene sempre sfuttato il contatto d'attrito con la pallina per far scorrere la racchetta verso l'alto e imprimere una rotazione dall'alto verso il basso in direzione del campo opposto. Al contatto con il terreno, il rimbalzo assume un angolo, rispetto al suolo, minore di un rimbalzo normale, rendendo l'intercettamento dell'avversario più difficile. Anche l'attrito con il suolo genera normalmente questo effetto, ed invertire il verso di rotazione richiede molto sforzo.
- Backspin o slice, si sfrutta lo stesso principio ma per ottenere l'effetto opposto al primo. Il giocatore ne ricorre spesso quando intende fare un colpo corto, oppure quando non riesce a posizionarsi in tempo in modo da sfruttare tutta la forza necessaria per contrastare la rotazione di un Topspin. Infatti, per eseguire uno slice occorre metà della velocità di movimento della racchetta. Generalmente la direzione dopo questo colpo cambia orientazione, mentre dopo un Topspin tende a rimanere la stessa, ovviamente in verso opposto.
- Flat, questo effetto si usa per la forza che si riesce ad imprimere, dato che privo di effetto rende intuitivo il comportamento. La traiettoria inoltre, non assume una caratteristica a parabola schiacciata come negli effetti precedenti, tende invece a curvarsi solo per effetto della forza di gravità, rendendo più facile l'uscita della pallina dal campo.
- Volley, viene usato nelle risposte ravvicinate, ovvero quando il giocatore si avvicina alla rete per una risposta veloce con un cambio di direzione altrettanto repentino.

Gli atleti professionisti, progredendo con il livello, necessitano sempre più di un'ottimizzazione dei movimenti e di attivazione dei muscoli. Nell'articolo [13] viene evidenziato come un giocatore di tennis dopo anni di allenamenti riesca ad isolare parte dei muscoli che si attiverebbero in un soggetto

normale in movimenti simili. In particolare, l'articolo [14] dimostra come nel colpo di Volley a diverse intensità, gli atleti professionisti riescano a variare l'intervento e l'intensità di certe regioni muscolari.

2 Modello fisico

Per caratterizzare il modello in questione servono delle considerazioni iniziali. Si procede quindi determinando il sistema di riferimento, il quale è ovviamente composto da tre assi essendo anche il movimento del giocatore molto complesso (figura 2.1).

- Il primo prende il nome di asse longitudinale, il quale determina gli spostamenti e le forze lungo l'asse verticale, o meglio parallelamente alla direzione della forza gravitazionale.
- Il secondo è perpendicolare all'asse longitudinale ed è chiamato asse trasversale, il quale fa riferimento alla linea immaginaria che congiunge le spalle dell'atleta.
- L'ultimo asse preso in considerazione è quello saggittale, perpendicolare ad entrambi gli assi precedenti. Quest'ultimo descrive gli spostamenti che il giocatore compierà in avvicinamento e in allontanamento rispetto al campo.

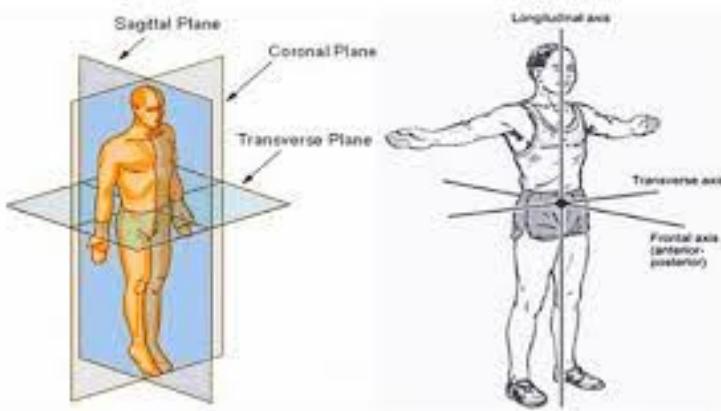


Figura 2.1: Figura rappresentante i tre assi e rispettivi piani del giocatore - Fonte: unikore

Come analizzato precedentemente nel capitolo 1, i muscoli e le articolazioni coinvolte nei movimenti sono molteplici, a tal punto che è doverosa una semplificazione del modello per una caratterizzazione matematica. L'analisi del modello prevede due metodologie possibili:

1. l'analisi dinamica diretta, dove si analizza ogni singola forza prodotta da muscoli ed articolazioni e se ne predice il movimento;
2. l'analisi dinamica inversa, dove data la cinematica di un corpo e le forze analizzate nello scambio tra corpi si suppongono i momenti e le forze impresse dal giocatore.

Nel caso in questione si affronterà la metodologia 2., dato che in seguito verranno analizzate a video le forze scambiate tra pallina ed il sistema racchetta-giocatore, e si cercherà di risalire alle singole forze espresse. Queste misure quindi, si potranno determinare attraverso equazioni di regressione basate sul peso, la statura e le dimensioni specifiche del corpo. Bisogna perciò costruire un modello che trovi un compromesso tra la complessità ed il risultato più realistico possibile. Viene infatti esclusa una caratterizzazione in punto materiale perché troppo semplificativa, dato che lo spazio di movimento è confrontabile con il giocatore, ed il suo spostamento è assolutamente rilevante per la determinazione dello scopo dell'elaborato. La soluzione scelta è di descrivere le articolazioni come semplici giunzioni

o cerniere prive di attriti, e i segmenti muscolari come corpi rigidi (2.2). Questa soluzione però, non prenderà in considerazione la deformazione dei corpi.

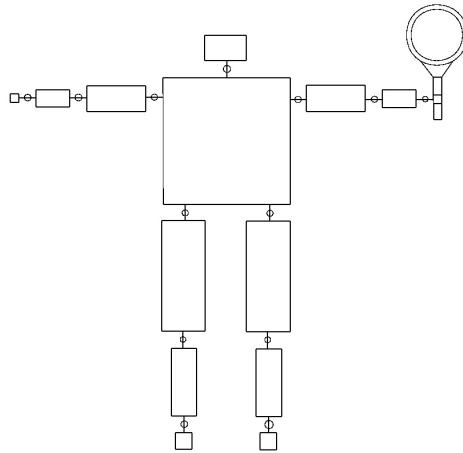


Figura 2.2: Figura rappresentante il modello semplificato - Fonte: disegno CAD

Si potrebbero approcciare due metodi principali per modellare la dinamica del gicatore, tramite il concetto energetico Eulero-Lagrange, oppure con l'ausilio delle equazioni alle forze ed ai momenti di Eulero-Newton. Entrambe riescono ad esprimere il fenomeno in questione, ma seppur le ultime siano più difficili da descrivere delle precedenti, permettono di scrivere equazioni separate per ogni segmento e possono venire applicate in maniera ricorsiva al modello, rendendo così più facile il carico computazionale. Per questo motivo è stato scelto il metodo Eulero-Newton.

2.1 Fisica della pallina

Secondo la federazione italiana di tennis [10], le dimensioni della pallina variano di diametro tra i 6,54 e i 6,86 centimetri, e ha massa compresa tra i 56 e i 59,4 grammi.

La pallina da tennis è formata da compositi di gomma ad alta qualità. La sua caratteristica più importante è la *rebound resilience*, anche nota in italiano come *resistenza al rimbalzo*. Quest'ultima è la proprietà che permette alla pallina di ritornare alla sua forma originale in seguito ad un impatto. Si rappresenta con r la *resistenza al rimbalzo*, cioè il rapporto tra l'altezza di rimbalzo h e l'altezza di caduta H , ed è data dalla seguente formula:

$$r = h/H = e^2 \quad (2.1)$$

dove e è il *coefficiente di restituzione* in combinazione con la superficie d'impatto.

Ad esempio, una pallina che cade da $2,54m$ di altezza, deve rimbalzare su una superficie solida in un range compreso tra $1,346m \leq h \leq 1,473m$, quindi la pallina deve avere un *coefficiente di restituzione* compreso tra circa $0,73 \leq e \leq 0,76$. È dimostrato, che con un incremento della velocità d'impatto, il coefficiente e diminuisce. Inoltre, se il corpo con cui viene a contatto è rigido, la quasi totalità dell'energia viene dissipata nella pallina. Il tipo di impatto viene definito visco-elastico. [2].

2.2 Fisica della racchetta

Sempre secondo la federazione italiana di tennis, la misura standard per una racchetta da tennis è di 27 pollici, circa 68,5 centimetri, mentre il peso deve essere compreso tra i 250 e i 330 grammi. Il peso però, si riferisce al solo telaio, senza considerare il peso delle corde e dell'*overgrip* che ogni giocatore sceglie di aggiungere. Si nota inoltre, che il baricentro della racchetta viene spesso spostato verso il manico per favorire la maneggevolezza e l'assorbimento delle vibrazioni della stessa.

Nel corso degli anni la racchetta ha subito varie trasformazioni materiali, dal legno alle leghe d'alluminio, fino alle fibre composite di oggigiorno. Ciò ha permesso ai giocatori di scagliare la pallina più velocemente e con maggior precisione.

Come descritto nell'articolo [11], incrementando la tensione delle corde della racchetta, diminuisce sia il tempo di contatto che la velocità di restituzione, nonché il coefficiente di restituzione e della stessa. Infatti, più le corde sono tese e maggiore è la precisione. In un range di tensione tra i $177N$ e i $355N$, il coefficiente e varia tra $0,773$ e $0,749$.

Anche questo tipo di impatto viene definito visco-elastico.

2.3 Fisica del giocatore

Come accennato precedentemente le equazioni di Eulero-Newton permettono di scrivere equazioni dinamiche separate per ogni segmento, o braccio. In questo modo si possono valutare in modo numerico e ricorsivo, e permettono perciò una risoluzione delle stesse in tempo prossimo al reale. Il metodo Eulero-Newton è denominato tale perché divide la risoluzione in due macro-equazioni (per semplicità di scrittura si ometterà il simbolo di vettore):

- equazione dinamica di Newton:

$$\sum f_i = \frac{d}{dt}(mv_c) = m\dot{v}_c \quad (2.2)$$

dove la somma delle forze determina la variazione della quantità di moto

- equazione dinamica di Eulero

$$\sum \mu = \frac{d}{dt}(Iw) = I\dot{w} + w \times Iw \quad (2.3)$$

dove la somma dei momenti determina la variazione del momento della quantità di moto

Date le equazioni soprastanti occorre richiamare alcuni concetti relativi alle matrici di inerzia ed ai momenti angolari.

La *matrice di inerzia* di un corpo rigido, è la grandezza che definisce le caratteristiche inerziali del corpo stesso rispetto alla rotazione. Essa viene definita specificando un punto rispetto a cui viene vincolata, di solito questo punto coincide con il *centro di massa* del corpo in questione (come in questo caso), ma ciò non è strettamente necessario.

Dato un corpo rigido G , indicato dal generico pedice g , e un sistema di riferimento R_l , il *centro di massa* di G ha posizione data dal vettore r_{cg}^l , definito come:

$$r_{cg}^l \int_G dm = r_{cg}^l m \quad (2.4)$$

dove $m = \int_G dm$ è la massa totale del corpo, la quale in questo caso sarà distribuita uniformemente nel corpo rigido G .

La *matrice di inerzia* $\Gamma_{g/c}^l \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ intorno al *centro di massa* in posizione r_{cg}^l viene definita dalla relazione

$$h_g^l = \Gamma_{g/c}^l w_g^l \quad (2.5)$$

dove h_g^l è il *momento angolare* del corpo rigido e w_g^l la sua velocità angolare totale, entrambi rappresentati nel sistema di riferimento R_l . Fissando R_l al *centro di massa* C , si può definire la *matrice di inerzia* nel seguente modo:

$$\Gamma_{g/c}^l = \begin{pmatrix} \Gamma_{xx} & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{yx} & \Gamma_{yy} & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{zx} & \Gamma_{zy} & \Gamma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Se si considerasse un altro sistema di riferimento R_k , la *matrice di inerzia* corrispondente si legherebbe alla precedente secondo la relazione

$$\Gamma_{g/c}^k R_l^k = R_l^k \Gamma_{g/c}^l \quad (2.7)$$

e nell'ipotesi che il sistema di riferimento sia fisso al corpo G , la matrice risulta costante nel tempo, altrimenti assumerebbe un carattere tempo-variante. Infine, se si volesse definire la matrice non più rispetto al punto C , ma rispetto ad un diverso punto O , si otterrebbe la stessa relazione base di somma di vettori con l'ausilio del metodo punta-coda come segue:

$$r_o = r_{co} + r_g \quad (2.8)$$

Ritornando alle equazioni di Newton-Eulero, e considerando i vettori tutti rappresentati nello stesso sistema di riferimento, si può procedere alla costruzione del modello.

Supponendo la semplificazione del modello del giocatore come raffigurato in figura , vanno considerate anche le forze e i momenti vincolari che vengono trasmessi dai corpi collegati al corpo in questione.

Il moto del corpo G , supposto perfettamente rigido, risulta composto da due moti distinti:

1. un **moto traslatorio** del suo centro di massa, il quale è descritto tramite le equazioni di Newton che impongono l'equilibrio di tutte le forze agenti sul corpo, comprese quelle dinamiche, rispetto al centro di massa

$$f_m + f_v + mg - ma_c = 0 \quad (2.9)$$

dove $a_c = \dot{v}_c = \ddot{r}_c$ è l'accelerazione del *centro di massa* C , g l'accelerazione di gravità, f_m la risultante delle forze attive applicate al corpo dall'esterno, e f_v la risultante delle forze vincolari tra i corpi.

2. un **moto rotatorio** intorno al centro di massa, descritto dalle equazioni di Eulero che impongono l'equilibrio di tutti i momenti agenti sul corpo, compresi quelli generati dalle forze d'inerzia, rispetto al centro di massa

$$\tau_m + \tau_v + \tau_m^f + \tau_v^f + \tau_g + \tau_a - \Gamma_\alpha - w \times \Gamma_w = 0 \quad (2.10)$$

dove τ_m è la risultante dei momenti attivi applicati al corpo dall'esterno, τ_v la risultante dei momenti vincolari, τ_m^f la risultante dei momenti dovuti alle forze esterne, τ_v^f la risultante dei momenti dovuti alle forze vincolari, τ_g il momento dovuto al campo gravitazionale e τ_a il momento dovuto alla forza d'inerzia $-ma_c$, mentre α è l'accelerazione angolare totale.

Come nel caso in questione però, l'equazione appena descritta può essere semplificata calcolando i momenti e la matrice d'inerzia rispetto al centro di massa, per cui i termini τ_g e τ_a equivalgono a 0, e l'equazione diventa:

$$\tau_m + \tau_v + \tau_m^f + \tau_v^f - \Gamma_\alpha - w \times \Gamma_w = 0 \quad (2.11)$$

Le equazioni espresse dunque, dipendono dalle accelerazioni lineari del centro di massa a_c , dell'accelerazione angolare α e dalla velocità angolare w .

Nonostante le precedenti definizioni, rimangono da descrivere una serie di forze genealizzate (forze e momenti) di vincolo, le quali sostituiscono i vincoli geometrici con appunto forze equivalenti. In questo punto la forma ricorsiva di risoluzione aiuta calcolando valori numerici, senza dover ricorrere alla rappresentazione simbolica.

Due oggetti puntiformi opportunamente collegati fra loro possono avere, nello spazio cartesiano, un totale di 6 parametri liberi di movimento (3 di posizione e 3 di assetto). Se si considerano N masse puntiformi nello spazio con 3 gradi di libertà, si possono definire $3N$ parametri, all'interno dei quali

vengono descritte tutte le traiettorie possibili, e lo spazio di questi parametri prende il nome di *spazio di configurazione*. In generale un vincolo si rappresenta in forma

$$\phi(x_1, \dots, x_{3N}, t) = 0 \quad (2.12)$$

ma dato che in questo caso non c'è una dipendenza temporale esterna che determina direttamente i vincoli, la precedente equazione diventa

$$\phi(x(t)) = 0 \quad (2.13)$$

Per semplicità si suppone che i vincoli siano tutti indipendenti e che n_v ne determini il numero. Si possono dunque esprimere n variabili indipendenti q_1, q_2, \dots, q_n , dove $n = 3N - n_v$, che prendono il nome di *variabili o coordinate generalizzate*

$$q(t) = \begin{pmatrix} q_1(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

le quali rappresentano univocamente il moto del multicropo, e tengono implicitamente conto dei vincoli cinematici presenti. Tutte le variabili di configurazione sono ricavabili da quest'ultime [3].

Per risolvere il problema cinematico inverso, bisogna prima determinare le variabili di giunto, una volta definita la posizione e l'orientazione dei corpi tra loro. Non esiste un procedimento generale per la soluzione, e quest'ultima può non essere unica, od addirittura avere infinite soluzioni. Si cercano quindi, le soluzioni in forma chiusa, che possono essere di tipo *differenziale chiusa*, cioè tale che $dw = 0$, oppure un'*espressione chiusa*, cioè definita da un numero finito di applicazioni di funzioni. Nell'esempio del modello in questione, una volta eliminate le reazioni vincolari e sostituite le equazioni adeguatamente, si giunge ad equazioni dinamiche in forma chiusa. Questa forma può essere ottenuta in due modi:

- uno di carattere **algebrico**, che consiste nella manipolazione delle equazioni fino ad ottenere un insieme di funzioni invertibili;
- uno di carattere **geometrico**, che si basa sulle possibili considerazioni geometriche, dipendenti dalla struttura del manipolatore, che aiutano nella risoluzione.

Un modo per velocizzare il tempo di calcolo ricorsivo è quello di sostituire ad ogni passo i valori numerici [3] [1].

Nel caso in questione però, considerando che lo scopo del report è estrapolare da un video i dati necessari, si può giungere alla conclusione che verranno analizzati solo i momenti relativi all'impatto e subito dopo. Perciò non servirà una caratterizzazione dell'intero moto.

Nella figura sottostante 2.3, sono rappresentate rispettivamente i momenti e le forze nei segmenti braccio ed avambraccio. L'articolazione del gomito, a differenza di spalla e polso, ha 1 solo grado di libertà, per cui $q_2 = \theta_2$. Facendo riferimento alla disposizione degli assi nelle figure, il gomito può ruotare soltanto rispetto all'asse z. Ciò impone che se il giocatore distendesse il braccio in posizione orizzontale, parallela al suo asse trasversale, e mantenesse la racchetta con una presa salda ma neutra del polso, il *momento d'inerzia* M_1 generico verrebbe contrastato dalla sola forza della spalla.

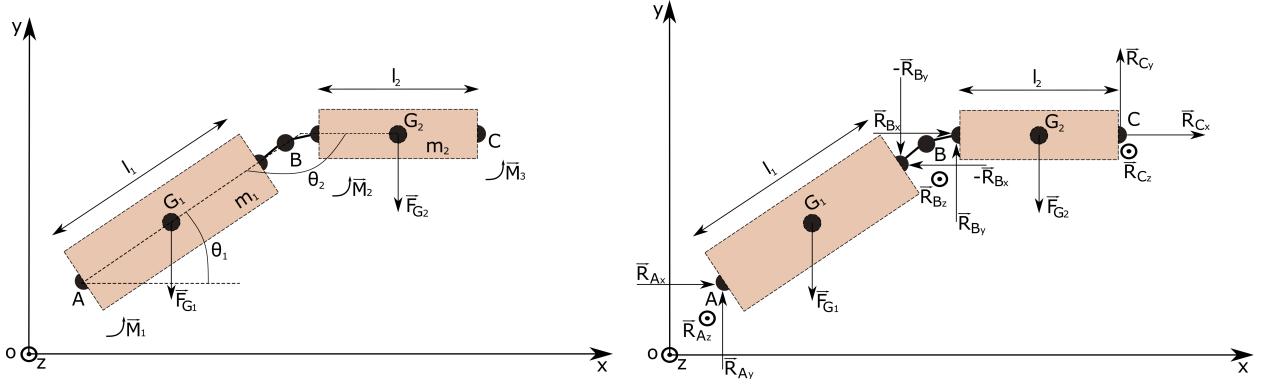


Figura 2.3: Figura rappresentante il modello dei momenti e delle forze semplificato dei segmenti braccio ed avambraccio - Fonte: disegno Inkscape

La coordinata A con $q_1 = (\theta_x, \theta_y, \theta_z)$, corrisponde alla giunzione della spalla, essendo quest'ultima una giunzione sferica, ha 3 gradi di libertà di rotazione ma nessuno di traslazione. Anche q_3 , corrispondente a C , sarà simile a q_1 , in quanto anche il polso si può definire una giunzione sferica, nonostante sia meno flessibile della spalla. Supponendo poi di conoscere la posizione della giuntura A , x_B sarà uguale a $x_A + l_1 \cos \theta_{1x}$, e x_C rispettivamente $x_B + l_2 \cos \theta_{2x}$, dove θ_2 viene definito rispetto al sistema di riferimento, per cui la coordinata q_{2x} risulta uguale a $\theta_{2x} + \pi - q_{1x}$.

Considerando il corpo rigido avente massa distribuita uniformemente, i momenti equivalenti delle forze vengono calcolati rispetto ai rispettivi baricentri. Inoltre, le forze e i momenti vincolari vengono trascurati, in quanto per lo scopo del report non è utile, dato che nella struttura corporea queste forze non sono mai tali da compromettere la rottura delle giunzioni. Perciò le equazioni 2.9 e 2.10 diventano rispettivamente:

$$f_m + mg - ma_c = 0 \quad (2.15)$$

e

$$\tau_m + \tau_m^f - \Gamma_\alpha - w \times \Gamma_w = 0 \quad (2.16)$$

Se si considera il caso statico, il termine $-ma_c$ del moto traslatorio risulta nullo, e la forza risultante f_m egualierà le forze di gravità $F_{G1}, F_{G2}, \dots, F_{GN}$, in modo tale da mantenere lo stato invariato.

Nel moto rotatorio, invece, chiamando $M_{\tau gi}$ il momento della forza sul corpo i , dove ad esempio $x_{G1} = x_A + \frac{l_1}{2} \cos \theta_{1x}$, si può scrivere l'equazione del momento della forza sul punto A come:

$$M_{\tau gi} = \{x_A - x_{Gi}, \dots, z_A - z_{Gi}\} \times \{R_{Ax}, \dots, R_{Az}\} + \sum M_{\tau gj} \quad (2.17)$$

dove $\sum M_{\tau gj}$ sono i contributi degli altri corpi collegati, e $\tau_m^f = \sum_i M_{\tau gi}$. Il momento d'inerzia τ_m alla spalla si può scrivere come:

$$\tau_m = \sum_i M_i = \sum_i I_i w_i = m_1 l_1^2 \frac{1}{3} \frac{dq_1(t)}{dt} + m_2 l_2^2 \frac{1}{3} \frac{d\theta_2}{dt} + m_3 l_3^2 \frac{1}{3} \frac{dq_3(t)}{dt} \quad (2.18)$$

dove $m_3 l_3^2 \frac{1}{3} \frac{dq_3(t)}{dt}$ è il contributo del polso che stringe la racchetta. Infine, la forza espressa dal sistema "in uscita" $M_{\tau 3}$ sarà uguale a

$$M_{\tau 3} = M_{\tau g1} + M_{\tau g2} \quad (2.19)$$

Considerando il caso del giocatore, precedentemente citato, con il braccio fermo in posizione orizzontale, le velocità angolari w_1 risulterebbero nulle, poiché essendo in un caso di statica, sarà presente

soltanto il *momento torcente* (o della forza)

$$M_{rg1} = \sum r_i \times F_{Gi} = l_1 m_1 g \sin 90 + (l_1 + l_2) m_2 g \sin 90 + (l_1 + l_2 + l_3) m_3 g \sin 90 \quad (2.20)$$

dove $(l_1 + l_2 + l_3) m_3 g \sin 90$ è il contributo del polso più la racchetta. Per il moto traslatorio, invece, sarà uguale al caso soprastante [7].

Per avere un'idea della massa distribuita nel corpo di un giocatore, ci si può avvalere degli appunti del corso di meccanica e biomeccanica dell'Università degli Studi di Cagliari [5]. Questo documento riporta la percentuale di massa distribuita sulle rispettive lunghezze delle parti del corpo (tabella 2.1) in base ad esperimenti su cadaveri e tramite l'ausilio di particolari bilance per l'analisi di distribuzione della forza peso.

Parte del corpo	Massa (%)	Approssimazione	Lunghezza (%)
Corpo totale	100		100
Testa e tronco	56,34	$\pm 2,45$	40,6
Braccio	2,64	$\pm 0,294$	18,8
Avambraccio	1,531	$\pm 0,166$	14,5
Mano	0,612	$\pm 0,058$	10,8
Coscia	10,008	$\pm 1,197$	24,5
Gamba	4,612	$\pm 0,534$	24,6
Piede	1,431	$\pm 0,142$	0,039

Tabella 2.1: Tabella raffigurante la percentuale di massa e altezza delle varie parti del corpo

2.4 Fisica dell'impatto

Come detto in precedenza l'impatto pallina-racchetta è definito visco-elastico, date le proprietà di entrambi. Questo comportamento è definito dal fatto che i due corpi si comportano sia come corpi elastici che come fluidi. L'impatto però può essere trattato come interazione tra corpi rigidi, dato che la considerazione di corpi elastici implica la caratterizzazione di vari coefficienti, tra cui la rigidità e lo smorzamento. Inoltre, questi fattori sono caratteristici al punto che anche una loro stima risulterebbe inefficace ai fini dello scopo del report. Si verificherà solo in seguito, la variazione della quantità di moto, che denoterà il contributo totale delle forze elastiche.

Interazione tra corpi rigidi: basta verificare la condizione di conservazione dei moti lineare ed angolare. Chiamando rispettivamente m_R e m_P le masse di racchetta e pallina, le equazioni da verificare risultano le seguenti:

- conservazione del moto lineare

$$m_P V_P + m_R V_R = m_P V'_P + m_R V'_R \quad (2.21)$$

- conservazione del moto angolare

$$m_P V_P x_{RC} + I_R w_R = m_P V'_P x_{RC} + I'_R w'_R \quad (2.22)$$

dove x_{RC} è la distanza tra la coordinata d'impatto e il baricentro della racchetta.

Definendo ora con V_{RI} e V'_{RI} la velocità del punto d'impatto sulla racchetta prima e dopo il contatto, si può ricavare il coefficiente di restituzione e (che in questo caso comprenderà anche il contributo della forza espressa dal giocatore) come segue:

$$e = -\frac{V'_P - V'_{RI}}{V_P - V_{RI}} \quad (2.23)$$

Sostituendo la 2.23 nelle equazioni precedenti segue:

$$V'_P = \frac{V_P(m_P x_{RC}^2 + I_R(\frac{m_P}{m_R} - e)) + V_{RI}I_R(1 + e)}{m_P x_{RC}^2 + I_R(1 + \frac{m_P}{m_R})} \quad (2.24)$$

Questo tipo di modello però tende a sovrastimare la velocità di restituzione della pallina [12].

3 Analisi del fenomeno con OpenPose

3.1 Premesse iniziali

Come analizzato più volte nel capitolo precedente il fenomeno reale risulta molto complesso e necessita di molte misurazioni. In questo caso però, alcune analisi risultano molto difficili da svolgere, come ad esempio il calcolo del moto rotatorio della pallina e della racchetta, in quanto servirebbero osservazioni specifiche dell'oggetto. Un altro aspetto da considerare è il fatto che le misurazioni verranno influenzate dalla qualità dell'immagine, dall'inquadratura, e dalla capacità di acquisizione in temini di velocità della videocamera.

Si potranno ricavare gli angoli di flessione e la traslazione delle braccia del giocatore direttamente dall'elaborazione di OpenPose. Inoltre, tramite la proporzione pixel-dimensione del giocatore, e con l'aiuto della tabella 2.1, si ricaverà la stima di lunghezza e massa di ogni segmento. Infine, con le equazioni descritte nel capitolo precedente, si potrà ricavare lo scambio delle quantità di moto e delle forze, risalendo quindi ai vari contributi articolari. I dati ricavati e quelli calcolati non verranno espressi tutti secondo il sistema internazionale, bensì faranno riferimento all'unità di misura delle immagini, i *pixel*. Ad esempio, le velocità intermedie verranno espresse in *pixel/s* invece che in *m/s*, mentre il conteggio dei secondi terrà conto dei frame-per-secondo del video analizzato.

Le informazioni che si potranno estrarre dall'analisi video dovrebbero risultare soddisfacenti, si riserva però, un giudizio concreto nelle conclusioni finali.

3.2 OpenPose ed OpenCV

OpenPose è un software, e libreria, per la stima real-time del posizionamento del corpo, in *2D* o *3D*, di una persona (3.1). Viene utilizzato in contesti di machine-learning, computer-vision ed analisi del movimento, perciò risulterà utile ai fini di questo report. OpenPose si basa su algoritmi di predizione della posizione futura, ed è in grado di identificare più persone contemporaneamente. È inoltre capace di distinguere gli arti e l'orientazione di una persona.

Per ottenere un'immagine come quella sottostante, occorre installare il software ed indicargli il file da elaborare. Una volta avviato, inizierà a tracciare i vari punti significativi. Questi punti vengono classificati secondo classi di appartenenza, come faccia, mani e corpo, e vengono salvati opportunamente in un file json. Tramite delle impostazioni si può scegliere come e quali punti memorizzare. Ad esempio, per la classe corpo si possono salvare i punti in *2D* o in *3D*, rispettivamente caratterizzati da $[x_i, y_i, c_i; \dots]$ o $[x_i, y_i, z_i, c_i; \dots]$, dove c_i è un valore compreso in un range $[0, 1]$ il quale indica il grado di certezza.

OpenCV è un'altra libreria per computer-vision ed elaborazione delle immagini. Contiene delle funzioni che permettono di applicare operazioni di base matematica sulle immagini, come ad esempio la sfocatura o l'identificazione di un colore. Quest ultimo può essere utilizzato per la *detection* della pallina, determinandone velocità e posizione.



Figura 3.1: Figura rappresentante l'elaborazione tipica di OpenPose - Fonte: [15]

Entrambe le librerie sono open-source e possono essere implementate in linguaggi di programmazione come *C++* e *Python*. Quest ultimo verrà utilizzato maggiormente in quanto permette di semplificare il codice e svolgere funzioni in modo più immediato.

3.3 Tecniche e teoria dell'elaborazione delle immagini utilizzate

3.3.1 Introduzione alle immagini digitali

Per prima cosa occorre definire cos'è un'immagine digitale.

Un'immagine digitale è una matrice di valori numerici rappresentati da un numero finito di bit, dove gli elementi di questa matrice sono detti *pixel* (*picture element*), maggiori saranno i *pixel* e maggiore sarà la risoluzione. Ogni valore contenuto in questi *pixel* sarà dunque associato ad uno o più valori numerici, che possono essere interi, reali o complessi. Inoltre, si può rappresentare in immagine digitale ogni tipo di grandezza fisica multidimensionale.

Le caratteristiche a cui diamo maggiore importanza, quando osserviamo un'immagine, sono colore e forma, e per una rappresentazione digitale è più importante l'aspetto percettivo, rispetto all'informazione rappresentata. Ad esempio, in un'immagine o in un video, ci soffermiamo maggiormente su oggetti in movimento o attivi, piuttosto che su strade o sfondi omogenei. In realtà, più le immagini sono dettagliate e più la vista è piacevole, ma in termini di *performance* od esigenze si predilige appunto l'aspetto percettivo.

Il colore dunque, è una prima tecnica per la caratterizzazione di un oggetto. La rappresentazione del colore si basa sulla teoria elaborata da Thomas Young, secondo la quale qualsiasi colore si può ottenere miscelando opportunamente tre colori primari. Inoltre, è stato scoperto che l'occhio umano è più sensibile ai colori giallo, verde e blu (3.2).

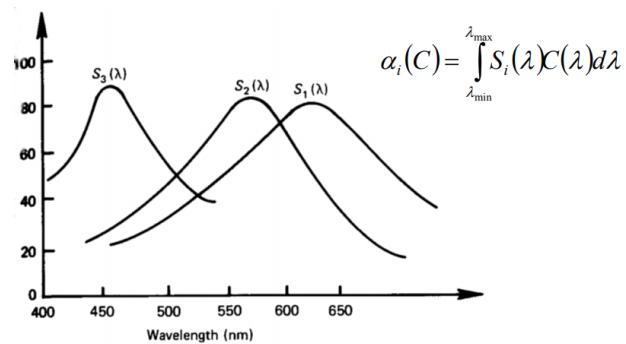


Figura 3.2: Grafico rappresentante la distribuzione spettrale di energia dei colori nell'occhio umano - Fonte: [9]

Il problema quindi, è trovare una funzione che rappresenti al meglio la percezione di ogni colo-

re. Una possibile soluzione è quella dello spazio HSB, dove i colori vengono classificati per tinta, saturazione e brillantezza (3.3).

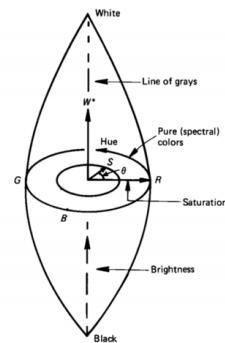


Figura 3.3: Rappresentazione dello spazio colore HSB - Fonte: [9]

Il problema della rappresentazione HSB è che non è fisicamente realizzabile, e per creare display reali occorre scegliere tra due casi:

- **sintesi additiva**, la quale partendo dall'assenza totale di luce (il nero), aggiunge luce. Un esempio è lo spazio colore RGB.
- **sintesi sottrattiva**, la quale procede in maniera complementare alla sintesi additiva, parte dal bianco ed aggiunge colore, come ad esempio lo spazio CMY.

I tre colori rappresentati sono rispettivamente rosso, verde e blu per lo spazio RGB, e i complementari giallo, ciano e magenta per lo spazio CMY. Questi spazi di colore però, per riuscire nella rappresentazione, richiedono a volte dei valori fuori range, come ad esempio negativi. Ciò li rende non fisicamente realizzabili, ma permettono comunque, un migliore risultato dal punto di vista percettivo rispetto all'informazione cromatica. Lo spazio cromatico standard scelto è quello RGB.

3.3.2 Tecniche di pre-processing

Nel *pre-processing* si cercano di accenutare alcune caratteristiche dell'immagine, in modo da migliorare la fruizione dei dati in un secondo momento.

Per definire la statistica del comportamento assunto dai *pixel* in un'immagine, si utilizza l'istogramma, il quale ne approssima anche la densità di probabilità associata.

Vengono definiti degli operatori puntuali che svolgono delle operazioni sul singolo *pixel*, e possono ad esempio aumentare il contrasto, rendere l'immagine negativa, o applicare una sogliatura, oltre alla quale viene assegnato il valore bianco o nero rispettivamente, ottenendo così un'immagine binaria.

Sono inoltre possibili, le operazioni tra più immagini, dove è necessario allinearle tra loro per svolgere operazioni sui *pixel* corrispondenti. Un esempio significativo è la differenza di immagini, la quale fa emergere variazioni e oggetti in movimento se le due immagini sono temporalmente successive (3.4).

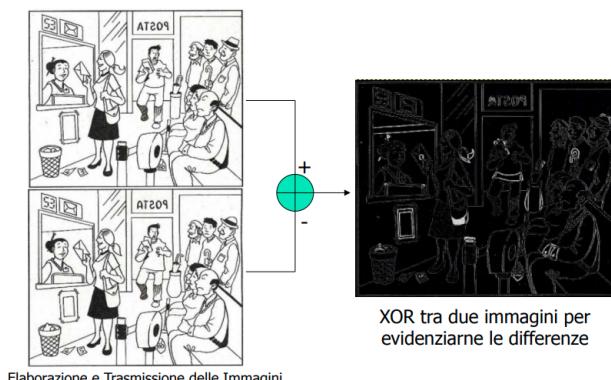


Figura 3.4: Differenza di tipo XOR tra sue immagini - Fonte: [9]

Un altro esempio è l'utilizzo di maschere per comporre delle immagini con livelli di sfondo e primo piano separati.

In questa sezione, viene anche trattato il problema della calibrazione della distanza e della scala degli oggetti presenti nell'immagine. Sfruttando punti noti, si possono dimensionare i parametri di distanza focale ed eventuali distorsioni, note ad esempio nella ripresa *fish-eye*.

3.3.3 Filtri digitali

I filtri digitali sono dei sistemi che trasformano un segnale digitale in ingresso $f(x, y)$, in un segnale in uscita $g(x, y)$, e caratterizzati da una risposta all'impulso $h(x, y)$ (3.5).

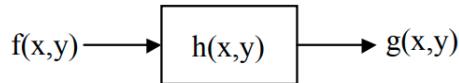


Figura 3.5: Rappresentazione di un filtro generico bidimensionale - Fonte: [9]

I filtri digitali, sono formati da un *kernel*, il quale è una matrice di dimensioni $n \times n$ che viene fatta scorrere su tutta l'immagine, sommata e moltiplicata con i valori contenuti nei *pixel* corrispondenti. Tra i compiti più comuni dei filtri digitali, si trovano la rimozione di certe tipologie di rumore, e il miglioramento od evidenziazione di certe caratteristiche come i contorni o le tessiture. Vengono infine classificati per linearità.

Tra i filtri lineari, si possono distinguere maggiormente tre tipologie:

- **passa-basso**, utilizzati per limitare gli effetti del rumore.
- **passa-alto**, utilizzati per l'estrazione dei contorni e per un miglioramento del contrasto.
- **passa-banda**, utilizzati per l'estrazione dei contorni e di componenti ad alte frequenze in presenza di rumore.

Tra i filtri non lineari, invece, troviamo i filtri di rango, anisotropi e morfologici. Quest'ultimi vengono utilizzati nelle operazioni sulle forme, dove si sfruttano in particolare i due operatori di base, erosione e dilatazione. Combinando opportunamente i due operatori, si ottengono altri operatori morfologici molto utili, come l'apertura e la chiusura. Il primo ha il compito di eliminare i dettagli più piccoli e di separare oggetti uniti debolmente, mette il secondo raggruppa quest'ultimi. Analizzando in particolare l'operatore di apertura, si nota come prima venga applicata un'erosione per l'eliminazione degli oggetti piccoli e indesiderati, e successivamente una dilatazione per riportare gli oggetti salienti a grandezza originale (3.6).

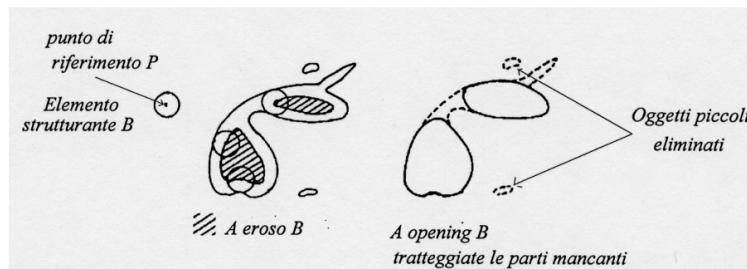


Figura 3.6: Rappresentazione di un esempio di apertura - Fonte: [9]

3.3.4 Estrazione di contorni

L'obiettivo di questa sezione è quello di descrivere il contenuto di un'immagine tramite contorni e regioni. Per eseguire quest'estrazione di informazione, vengono distinte tre operazioni connesse tra loro:

- rilevazione, o detection, identifica i pixel nei contorni dell'immagine. Restituisce come output un'immagine binaria.
- estrazione dei contorni, concatena i punti trovati e fornisce in output un insieme di curve.
- caratterizzazione, partendo dalle curve estrae parametri come la lunghezza, la curvatura, etc. In output fornisce un insieme di valori numerici per ogni contorno.

I punti di contorno sono caratterizzati da transizioni ripide di luminosità o di colore tra i pixel vicini. Questi contrasti netti contengono alte frequenze che gli algoritmi di rivelazione possono sfruttare (3.7) [9].

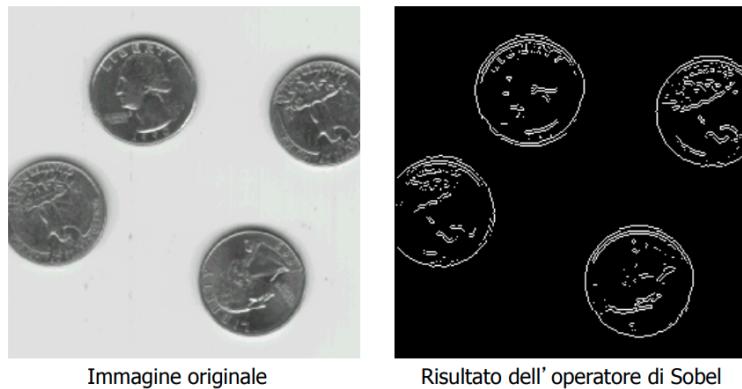


Figura 3.7: Esempio di edge detection tramite l'operatore di Sobel - Fonte: [9]

3.4 Svolgimento e problematiche generali

Innanzitutto, sono stati analizzati i video di cui si disponeva, poiché capirne le caratteristiche è fondamentale per un'efficace strategia di elaborazione. In questo caso erano quattro, uno in ripresa laterale, uno in diagonale e due al rallenty, ciascuno per ognuna delle inquadrature precedenti. Si è subito notata un'importante differenza tra i video ripresi in tempo reale e quelli con tecnica *slow-motion*. Mentre entrambi venivano riprodotti a 25fps (indicanti il numero di immagini per secondo di video), nel primo caso i movimenti erano ovviamente molto più rapidi e la fotocamera non è stata in grado di catturare le singole scene a dovere. Infatti, la pallina assumeva una forma allungata (3.8), dato anche dal fatto che le immagini vengono memorizzate riga per riga, da sinistra verso destra. Un ulteriore contributo a questa problematica può essere attribuito alla probabile tecnica di memorizzazione interlacciata. Quest'ultima, memorizza le righe pari separatamente da quelle dispari, per poi combinarle. Queste problematiche generano un disallineamento temporale tra le righe.

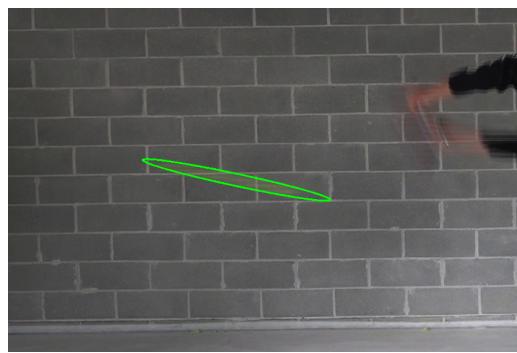


Figura 3.8: Caso critico di pallina allungata - Fonte: elaborazione video

Il problema appena descritto è comune nei video a basso *frame-rate*, dove sono presenti oggetti in movimento ad elevata velocità. La soluzione più immediata, e più ovvia, è quella di alzare questo valore di ripresa, ma può darsi che in alcuni casi questo non sia possibile, oppure le risorse richieste

siano troppo elevate. Esistono però dei metodi di risoluzione, come ad esempio quello descritto nella reference [6], dove si tratta di suddividere il procedimento in tre algoritmi. Il primo determina la presenza di oggetti simili e le loro proprietà, mentre il secondo ne predice la traiettoria anche nel caso di un’occlusione parziale o totale dell’oggetto. L’ultimo, infine, ne verifica la presenza nel luogo predetto. Tutti gli algoritmi richiedono un contrasto sufficiente tra gli oggetti e lo sfondo, e un’immagine del solo sfondo.

Date queste problematiche però, si è scelto di non utilizzare i video a velocità reale, procedendo quindi con quelli al rallenty. Non conoscendo però i *frames per second* originari di quest’ultimi, se ne è stimato il valore considerando che il dispositivo di ripresa poteva essere una Gopro (famosa marca di *action cam*) o simile, e paragonando il tempo di scambio con il video a velocità reale. Ne è emerso che la ripresa originaria sarebbe potuta avvenire a 240fps , il cui rallentamento a $24/25\text{fps}$ corrisponde al 10% di *slow-motion* possibile dichiarato dalla casa manifatturiera. Perciò si è proceduto tenendo in considerazione il fattore 10 di scala temporale.

Un’ulteriore problematica è stata riscontrata nel video in ripresa obliqua, poiché una forte sorgente di luce era direzionata contro il giocatore, generando così delle fastidiose ombre (3.9).

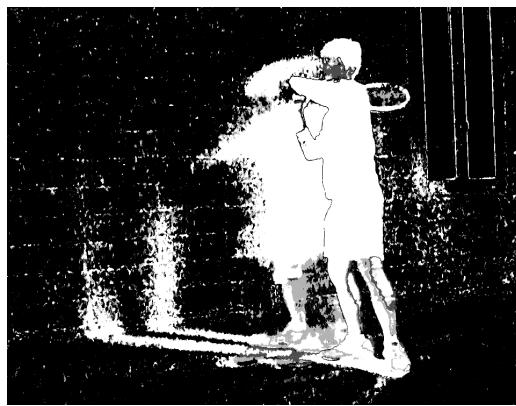


Figura 3.9: Caso critico di presenza di ombre - Fonte: elaborazione video

Si è quindi scelto di procedere con il video in ripresa laterale al rallenty.

Per la detection della pallina e del giocatore sono stati adottati due metodi differenti. Per la prima è stata utilizzata la funzione di *background subtraction* di OpenCV, la quale prevede una segmentazione dello sfondo con multipli filtri passa-basso di tipo gaussiano. Questa funzione confronta due frames successivi per caratterizzare e differenziare lo sfondo da ciò che è in movimento, eseguendo poi delle operazioni di sottrazione dell’immagine e di sogliatura (o *thresholding*). Sono state applicate, inoltre, due operazioni leggere di apertura e chiusura per eliminare tutto ciò che non comprendeva la pallina o il giocatore (3.10).

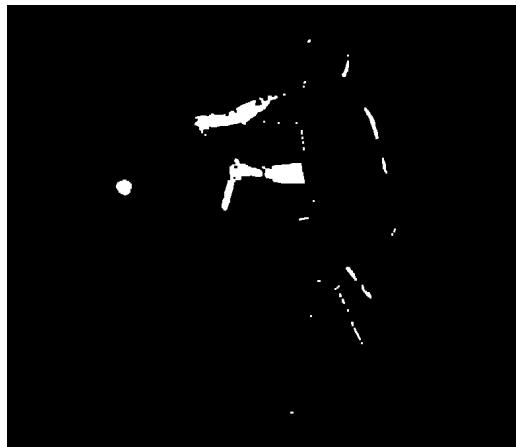


Figura 3.10: Maschera per la detection della pallina - Fonte: elaborazione video

Si è cercato di applicare una detection per colore, ma l'informazione disponibile era troppo carente per attuare un *tracking* efficace. Ad esempio, quando la pallina aumentava di velocità, diminuivano tutti i valori di tinta, saturazione e luminosità, lasciando solo pochi pixel come rappresentazione. Questi ultimi sarebbero stati eliminati dalle operazioni morfologiche di apertura e chiusura, annullando così il tracciamento.

Per la detection del giocatore invece, si è proceduto mediando l'intero video e salvando il risultato in un'immagine .png (3.11).



Figura 3.11: Risultato della media dei frames - Fonte: elaborazione video

Dopodichè il procedimento è stato simile alla funzione descritta precedentemente, è stata sottratta l'immagine salvata ed eseguita una sogliatura ad ogni frames. Per eliminare la pallina e il rumore di fondo, è stata applicata un'operazione di apertura abbastanza intensa, ottenendo così il risultato in figura 3.12. Come si può notare, maglietta e pantaloncini sono stati completamente eliminati dall'operazione di sottrazione, poichè hanno un colore che è molto in contrasto con lo sfondo, e come si nota dalla figura 3.11, quella regione è pressoché costante in posizione nel tempo.

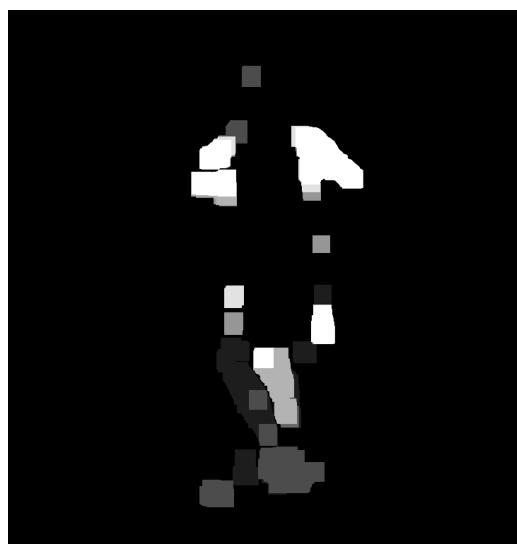


Figura 3.12: Risultato della media dei frames - Fonte: elaborazione video

A questo punto, si possono estrarre dei contorni per cercare di isolare il giocatore dal resto della scena. Si nota però, che non si dispone di un'immagine adatta, dato che la figura del giocatore è segmentata in regioni piccole e distaccate. Queste regioni però sono tutte proprie del giocatore, perciò possono essere concatenate. Con la funzione *draw contours* si possono dunque disegnare gli estremi della concatenazione, così da ottenere la figura 3.13.

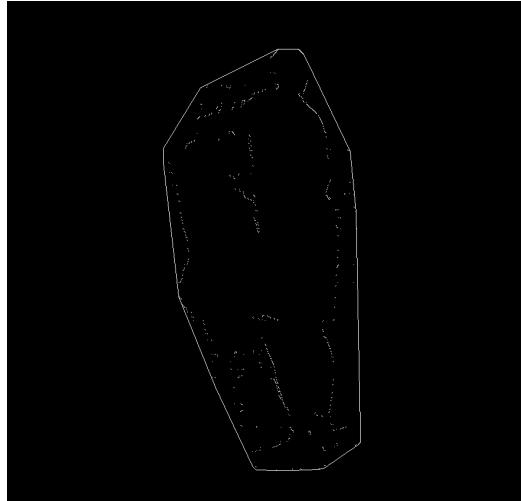


Figura 3.13: Maschera giocatore - Fonte: elaborazione video

Dopodichè si cerca il valore più a sinistra, che in questo caso coincide con la provenienza della pallina, per determinare la soglia oltre alla quale la pallina non sarà più distinguibile dal giocatore, e dove avverrà il cambio di direzione.

Per il tracking della pallina è stata usata di nuovo la funzione *find contours*, sempre di OpenCV, la quale restituisce un vettore di vettori di punti a cui è stato applicato un controllo di circolarità e di area, ottenendo così l'identificazione abbastanza fedele della pallina (3.14).

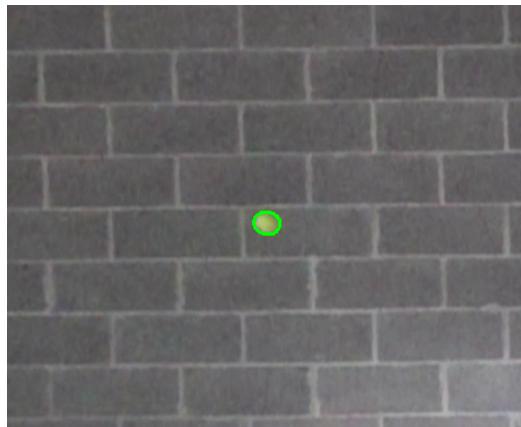


Figura 3.14: Identificazione pallina - Fonte: elaborazione video

A questo punto si è proceduto con il calcolo della velocità e della traiettoria in entrambe le direzioni. Ne è risultato che la velocità finale di risposta si attestava sugli $8m/s$. Seguendo delle stime di proporzione tra pixel e metri corrispondenti, e considerando che gli scambi avvenivano in modo blando, il risultato sembra veritiero.

Una volta ottenuta la velocità, si è proceduto calcolando la forza espressa nello scambio, o nell'impatto. È stata usata la seguente formula:

$$F = \frac{v_f * m_p}{t_c} \quad (3.1)$$

dove v_f indica la velocità finale all'impatto, m_p la massa della pallina ($0.058kg$ come stima media), e t_c il tempo di contatto, il quale valore è stato considerato uguale a 0.005 , secondo le informazioni riportate nei paper precedentemente citati.

Questa forza quindi, corrisponde ai contributi delle forze elastiche e del giocatore. Perciò, verificando la condizione di conservazione della quantità di moto, questa non verrà rispettata, e la differenza sarà attribuita alle costanti elastiche di racchetta e pallina. Essendo però molto difficile misurare la massa della racchetta nell'impatto, in quanto comprende anche il contributo del giocatore che la spinge

mantenendola salda, si è stimato il fattore di restituzione delle forze elastiche totali come 0.7 per la velocità di arrivo della pallina. Infine, è stato calcolato il contributo del giocatore, sottraendo quello delle costanti elastiche, ottenendo così una forza espressa di circa $54.8 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$.

Una volta ottenuta la forza totale espressa dal giocatore si è proceduto analizzando i dati del file .json creato dall'elaborazione di OpenPose. Per filtrare i dati superflui, si è verificata la posizione del polso più arretrata, la quale coincide con il momento di carica per il colpo. Per cui, sono stati salvati i dati da quell'istante fino al momento del contatto con la pallina, e quindi al suo cambio di direzione. È stato possibile, tramite la tabella 2.1, stimare la lunghezza degli arti e il loro peso per procedere con i calcoli di forze e momenti.

A questo punto sono sorti due grandi problemi. Il primo è la mancanza dell'intero asse di profondità, poiché l'elaborazione è stata eseguita su un'immagine 2D, il secondo risulta dalla sintesi di OpenPose, il quale non fornisce i punti in maniera assai precisa. Perciò, sono state considerate delle approssimazioni, e dei controlli sulla rotazione, rispetto all'asse verticale, dei segmenti. Quest'ultimi, si è cercato di verificarli imponendo una soglia di variazione di lunghezza, in modo tale che se la variazione risultasse eccessiva si sarebbe in presenza di una rotazione di questo tipo. Date però, le problematiche sulla stima delle posizioni, si riesce ad identificare soltanto un angolo di rotazione considerevole.

Un'altra problematica è dovuta al fatto che il giocatore destroso è stato ripreso dalla sua sinistra, e ciò sarebbe particolarmente critico se al momento dell'impatto il corpo oscurasse interamente il braccio destro, poiché non sarebbe possibile determinare l'angolo di flessione del gomito, ed un'eventuale rotazione dello stesso (3.15).



Figura 3.15: Immagine raffigurante il caso critico di non identificazione del braccio - Fonte: elaborazione video

3.5 Risultati

Come già descritto nel capitolo precedente, le molteplicità di difficoltà hanno portato ad una caratterizzazione del fenomeno in maniera pressochè approssimata. Ad esempio, la conservazione del moto angolare non è stata possibile da misurare, poiché sia la coordinata d'impatto, sia il baricentro della racchetta sono state stimate, in aggiunta, la sua velocità angolare non è risultata possibile da caratterizzare, in quanto manca l'intero asse di profondità, rendendo il raggio non determinabile.

I termini misurabili per cui, sono risultati essere: f_m, mg, ma_c per le forze, $\tau_m, \tau_m^f, \Gamma_a$ per i momenti, e le varie quantità di moto.

In figura 3.16 sono riportati i valori dei vettori risultanti delle forze. Questo grafico è anche il più affidabile dal punto di vista numerico, poiché le equazioni sono tutte relative a forze che ricadono nel piano x, y (verticale ed orizzontale). Come si può notare, ad esempio, la forza risultante alla spalla è la più significativa, infatti, deve sostenere maggiore massa rispetto ai punti di gomito e polso. Si nota inoltre, che è presente un periodo di forza costante, il quale coincide con la forza che il giocatore impiega per portare la racchetta alla velocità finale, subito prima dell'impatto. Dopo il secondo 0.4, è

presente un rapido declino, corrispondente con la decelerazione misurata appena dopo il colpo. Infine, la decelerazione risulta moderata e controllata dal solo giocatore, il quale si prepara per la prossima risposta.

La forma squadrata del grafico è una conseguenza di approssimazioni e semplificazioni, ma utile per immaginare ciò che accade durante il fenomeno. Ad esempio, la forza iniziale non avrebbe una pendenza verticale, bensì formerebbe una curva più dolce, ma dato che questa misura risulta superflua allo scopo del report, si è deciso di intraprendere questa concezione.

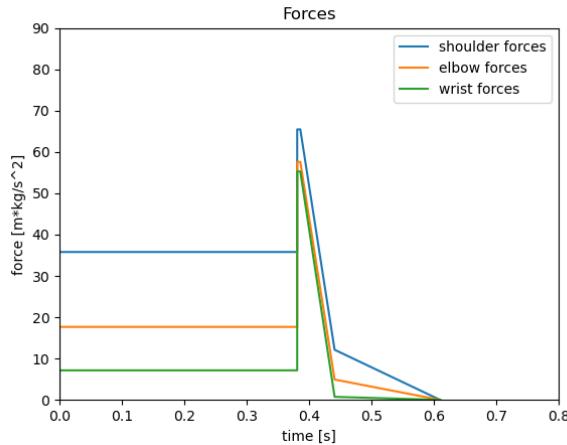


Figura 3.16: Grafico delle forze totali - Fonte: elaborazione video

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei momenti invece, alcuni dati sono risultati mancanti, od addirittura non possibili da ottenere. Ad esempio, la misura della rotazione dell'avambraccio rispetto all'asse verticale è stata quasi del tutto compromessa. Come già accennato nel capitolo precedente, le stime delle dimensioni dei corpi e l'elaborazione da parte di OpenPose, non hanno permesso una misura accurata delle variabili. Ad esempio, il momento alla spalla sarebbe dovuto risultare più consistente, in quanto la rotazione del gomito avrebbe aumentato la forza di rotazione della spalla rispetto all'asse verticale (3.17). Inoltre, un eventuale allontanamento del gomito verso l'esterno avrebbe generato un momento lungo l'asse orizzontale, facendo cambiare anche considerevolmente il risultato. Un risultato interessante è avvenuto al gomito, nonostante la quantità di forza applicata il momento è il più debole di tutti. Ciò è una conseguenza del fatto che questa articolazione possiede un unico vincolo di rotazione, in più, se il segmento dell'avambraccio formasse una linea parallela con l'asse orizzontale, il momento risultante sarebbe nullo. Infatti, è stato rilevato un angolo di quasi 12° tra il segmento e l'asse orizzontale, avendo come conseguenza un debole momento risultante.

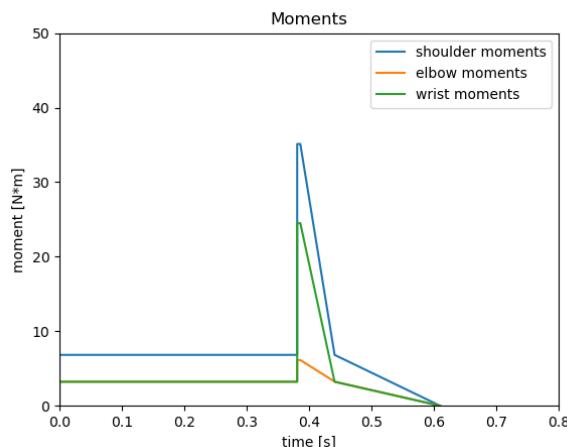


Figura 3.17: Grafico dei momenti totali - Fonte: elaborazione video

Per raccogliere altri dati utili alla caratterizzazione del fenomeno, si è scelto di usare una sequenza del video in ripresa laterale a velocità normale. Si è perciò misurata la velocità della pallina prima e dopo l'impatto a mano, per poi inserire nel programma i dati necessari per processare ed analizzare i file .json corrispondenti. Ne è emerso che le forze in gioco erano maggiori, date da una velocità di scambio più alta rispetto al caso precedente. Di conseguenza anche il tempo di scambio è diminuto, lasciando però le proporzioni tra spalla, gomito e polso pressoché costanti (3.18 e 3.19).

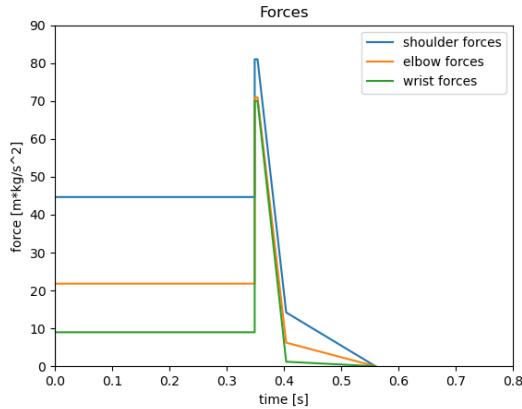


Figura 3.18: Grafico delle forze totali - Fonte: elaborazione video

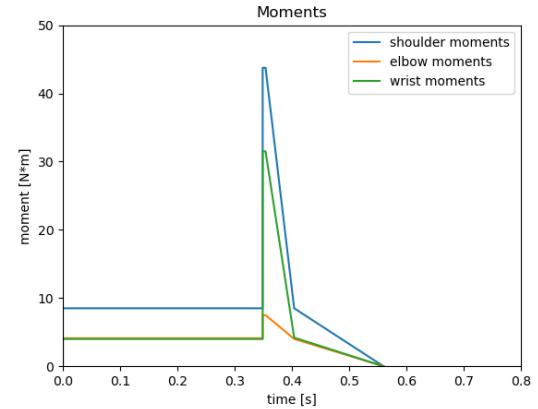


Figura 3.19: Grafico dei momenti totali - Fonte: elaborazione video

Conclusioni

Come si nota dai risultati ottenuti, e come precedentemente accennato, la suddivisione delle forze e dei momenti nei due casi sono proporzionalmente molto simili, in quanto i movimenti analizzati erano pressoché uguali. Ciò porta a concludere che nel caso specifico di un dritto, cioè il movimento analizzato in entrambi i casi, le forze e i momenti sono maggiori all'articolazione della spalla, e mentre le forze al gomito sono maggiori di quelle al polso i momenti si comportano al contrario. Nonostante il basso valore dei momenti al gomito però, è famosa la patologia del gomito del tennista che comporta un'infiammazione locale dei tendini. Infatti, data la rigidità dell'articolazione e l'unico vincolo disponibile, tutte le rotazioni muscolari di braccio e avambraccio si dissipano al gomito che non può altro che assorbirne il movimento meccanico. Fenomeni come questo però, non sono possibili da determinare, ma vengono presi in considerazione dallo staff medico del giocatore.

Un problema importante riscontrato durante lo svolgimento del report, è stato la mancanza dell'intero asse di profondità, il quale nel calcolo dei momenti ha avuto un'influenza notevole. I risultati per cui risultano sottostimati, ma comunque realistici per quanto riguarda le rotazioni y e z . OpenPose è in grado di estrapolare dati spaziali se forniti due video della stessa scena ad angolazioni differenti, ma in questo caso non se ne disponevano. Infatti, con questa caratteristica si possono verificare, tramite la triangolazione, la distanza degli oggetti rispetto al punto centrale tra le telecamere. OpenPose mette a disposizione un altro metodo per estrarre le coordinate spaziali da un singolo video bidimensionale, ma non è stato affrontato in questo caso per mancanza di informazioni e tempo.

Un altro problema risulta dal fatto che la telecamera è posizionata nel lato opposto della mano di servizio del giocatore, quest'ultima sparisce spesso dalla detection di OpenPose, e nel video al rallenty il tracking non è molto accurato. Si nota infatti, che i punti di detection cambiano posizione di frequente e le variazioni non sono sempre trascurabili, ciò rende difficile un'analisi automatizzata da un possibile futuro programma. Inoltre, OpenPose richiede un'elevata potenza di calcolo proveniente da processori grafici per poter processare la scena in tempo reale, perciò normalmente l'analisi avverrà sempre a posteriori. Per cercare di automatizzare l'analisi, si potrebbe inanzitutto procedere inquadrando la

scena con almeno due telecamere, così da sfruttare il rendering *3D* di OpenPose, riuscendo così ad estrarre meglio la scena e le misure, inoltre il rumore si ridurrebbe e si potrebbe identificare anche la racchetta. Quest'ultima nasconde un altro problema, cioè l'angolo che si forma con l'avambraccio, fin'ora stimato tra i 90 e i 100 gradi. Inoltre, l'angolo del gomito cambia in base alla prospettiva, e la spalla, essendo una giunzione sferica, cambia il riferimento dell'angolo di piega del gomito a sua volta.

In conclusione, mi sento di affermare che un'analisi di questo tipo risulta utile per la stima delle varie componenti fisiche, ma necessiterà sempre del supporto di un occhio umano esperto per la cura della postura nei vari movimenti.

Bibliografia

- [1] De Luca A. *Modello dinamico dei robot: approccio di Newton-Eulero*. Sapienza Università di Roma, A.A. 2008-2009.
- [2] Wadhwa A. Measuring the rebound resilience of a bouncing ball. *Physics Education*, 47(5):620–626, Sett. 2012.
- [3] Bona B. *Dinamica dei sistemi multicropo*. Politecnico di Torino, 2003.
- [4] Elliot B. Biomechanics and tennis. *Br. J. Sports Med.*, 40(5):392–396, May 2006.
- [5] Leban B. *Appunti del corso di fondamenti di meccanica e biomeccanica*. Università degli Studi di Cagliari.
- [6] Rozumnyi D., Kotera J., Sroubek F., Novotny L., and Matas J. The world of fast moving objects. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 23 Nov. 2016.
- [7] Dalio M. e Bortoluzzi D. *Appunti del corso di sistemi meccanici e modelli*. Università degli Studi di Trento, A.A. 2017-2018.
- [8] Kovacs M. ed Ellenbecker T. An 8-stage model for evaluating the tennis serve. *Sports Health*, 3(6):504–513, Nov. 2011.
- [9] De Natale F. *Appunti del corso di elaborazione e trasmissione delle immagini*. Università degli Studi di Trento, A.A. 2019-2020.
- [10] Federazione italiana tennis FIT. Le palline. <http://www.federtennis.it/>. ultimo accesso 14/06/2020.
- [11] Linlin L., Seung H.Y., Chang-Soon H., and Young S.K. Effects of string tension and impact location on tennis playing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23:2990–2997, Nov. 2009.
- [12] Goodwill S.R. *The dynamics of tennis ball impacts on tennis rackets*. EThOS Import Sheffield, Giu. 2016.
- [13] Ivancevic T., Jovanovic B., Dukic M., Markovic S., and Dukic N. Biomedical analysis of shots and ball motion in tennis and the analogy with handball throws. *Physical Education and Sport*, 6(1):51–66, 2008.
- [14] Chow J. W., Carlton L. G., Lim Y.-T., Shim J.-H., Chae W.-S., and Kuenster A. F. Muscle activation during the tennis volley. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31(6):846–854, Giu. 1999.
- [15] Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., and Sheikh Y. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields. In *arXiv preprint arXiv:1812.08008*, 2018.

Sitografia

- Protennistips
- Thetennistribe
- Tesi Stignani
- Biomechanics and tennis
- An 8-Stage Model for Evaluating the Tennis Serve
- Biomechanical analysis of shot and ball motion in tennis and the analogy with handball throws
- Effects of string tension and impact location on tennis playing
- Upper Limb Joint Torque Distribution Resulting from the Flat Tennis Serve Impact Force
- Comparison of a finite element model of a tennis racket to experimental data
- A computer simulation model of tennis racket/ball impacts
- The influence of body height on the serve in tennis
- Muscle activation during the tennis volley
- Kinetic of human motion
- Joint Kinetics to Assess the Influence of the Racket on a Tennis Player's Shoulder
- MECCANICA DEL CORPO RIGIDO – RIEPILOGO CONCETTI FONDAMENTALI
- Modello dinamico dei robot: approccio di Newton-Eulero
- Dinamiche dei sistemi multicorpo
- Cinematica diretta ed inversa manipolatori seriali
- Robotica industriale
- Fondamenti di meccanica e biomeccanica
- Measuring the rebound resilience of a bouncing ball
- Federtennis
- THE DYNAMICS OF TENNIS BALL IMPACTS ON TENNIS RACKETS
- OpenPose