

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA
FACOLTA' DI MEDICINA VETERINARIA

DIPARTIMENTO DI PRODUZIONI ANIMALI, BIOTECNOLOGIE
VETERINARIE, QUALITA' E SICUREZZA DEGLI ALIMENTI

*Dottorato di Ricerca in "Produzioni Animali, Biotecnologie Veterinarie,
Qualita' e Sicurezza degli Alimenti"*

**STUDIO SULLA BIOMECCANICA
DELLA COLONNA VERTEBRALE
IN CANI DI RAZZA BOXER**

Dissertazione del
Dott. Stefano Gosi

Relatore
Prof. Pier Giovanni Bracchi

Coordinatore
Prof. Primo Mariani

XXI Ciclo

Esame finale 2009

INDICE

Storia della biomeccanica	pag.	1
1. Introduzione	pag.	4
Scopo della ricerca.....	pag.	6
2. Materiali e Metodi	pag.	8
2.1 Soggetti cani analizzati	pag.	8
2.2 Dove applicare i markers	pag.	10
2.3 Come applicare i markers	pag.	12
2.4 Definizione di piano sagittale mediano	pag.	15
2.5 Treadmill.....	pag.	16
2.6 Risoluzione della telecamera	pag.	17
2.7 SIMI Motion	pag.	18
3. L'analisi di immagini	pag.	20
3.1 L'analisi del movimento	pag.	20
3.2 Il sistema di coordinate	pag.	21
3.3 Dati temporali	pag.	22
3.4 Fasi di ripresa.....	pag.	22
3.5 Cattura delle immagini.....	pag.	22
3.6 Esame dei dati grezzi (Raw data)	pag.	23
3.7 Calcolo delle coordinate 2-D	pag.	24
3.8 Rappresentazione dei dati	pag.	25
3.9 Come rappresentare i dati	pag.	25
3.10 Taglio in fasi	pag.	28
3.11 Calcoli statistici.....	pag.	31
4. Descrizione del movimento	pag.	35
4.1 Movimento della Vertebra T1-T3.....	pag.	35

4.2 Movimento della Vertebra T1-T6.....	pag.	36
4.3 Movimento della Vertebra T1-T9.....	pag.	37
4.4 Movimento della Vertebra T1-T11.....	pag.	39
4.5 Movimento della Vertebra T1-T13.....	pag.	40
4.6 Movimento della Vertebra T1-L1.....	pag.	43
4.7 Movimento della Vertebra T1-L3.....	pag.	46
4.8 Movimento della Vertebra T1-L5.....	pag.	47
4.9 Movimento della Vertebra T1-L6.....	pag.	49
4.10 Movimento della Vertebra T1-S.....	pag.	50
4.11 Match points riferiti al tempo.....	pag.	53
4.12 Distanze massime raggiunte.....	pag.	56
5. Studio e modellazione della colonna vertebrale.....	pag.	60
6. Risultati sperimentali.....	pag.	63
7. Conclusioni e discussione dei dati.....	pag.	66
Sviluppi futuri.....	pag.	69
Bibliografica.....	pag.	70

Premessa

Storia della biomeccanica

L'uomo è sempre stato affascinato dalle creature che lo circondavano. Le pitture



rupestri stanno a significare questo suo interesse.

Tra gli animali rappresentati con maggior frequenza da questi nostri progenitori, i mammiferi rivestono sicuramente un ruolo fondamentale.

Queste antiche popolazioni non erano solo ammagliate dall'animale in sé, ma anche quasi sempre dal suo movimento.

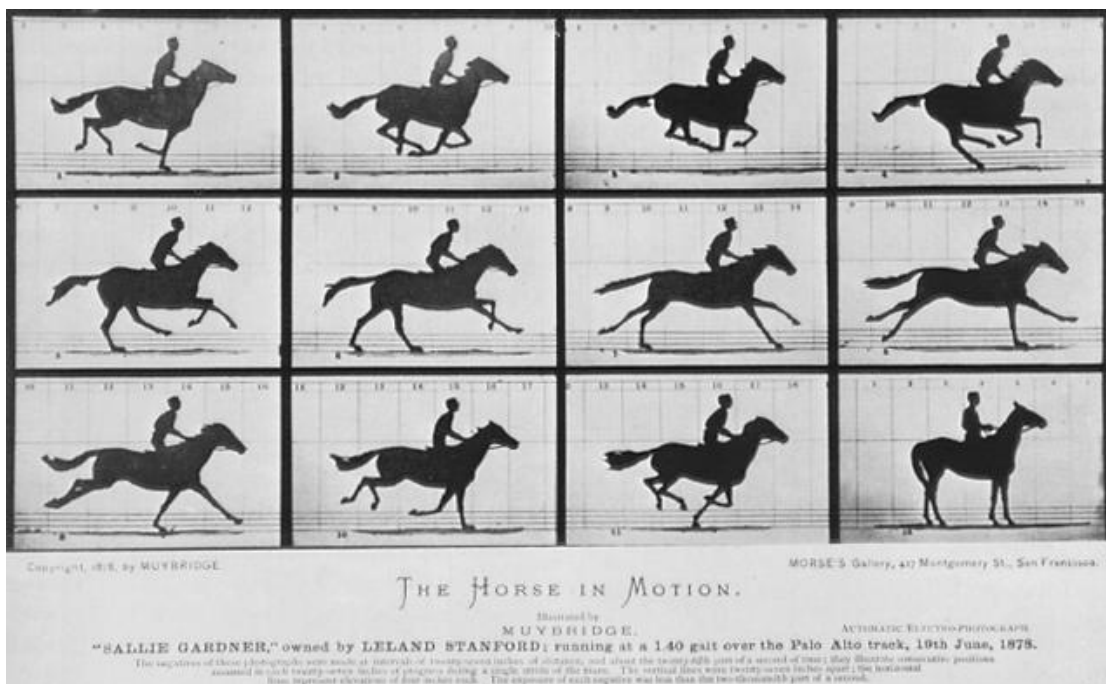
Raramente troviamo dipinti rupestri in cui gli animali vengono rappresentati in forma statica, al contrario la loro rappresentazione, se pur in modo approssimativo, risulta essere quasi sempre dinamica.

La rappresentazione del movimento, soprattutto quello animale, è stato anche nei secoli successivi un qualcosa con cui gli artisti, pittori e scultori si sono sempre cimentati.



Un secolo dopo la Rivoluzione Francese che aveva cambiato il mondo politico, una rivoluzione avvenne anche nel campo dell'analisi dell'andatura equina. Sino a quel momento le analisi delle andature erano puramente teoriche, dovute alle osservazioni

dell'occhio umano, con tutti i suoi limiti soprattutto quando si osservano movimenti molto veloci. Nel 1882 R. Muybridge con il suo famoso esperimento a Palo Alto (Ca), pose le basi di quella che sarebbe stata la moderna biomeccanica. Lo studio venne fatto utilizzando 24 macchine fotografiche, che in sequenza, a tempi predeterminati, con un'esposizione sotto 1/6000 di secondo, catturavano le immagini di cavalli che si muovevano sia al trotto che al galoppo. L'aver fermato gli istanti del movimento degli animali, ha permesso a Muybridge e agli esperti del settore, di avere a disposizione dati oggettivi e continui della sequenza dei movimenti degli equini. Questo primo esperimento, altamente tecnologico per il tempo, ha cambiato il modo di vedere quello che sino ad allora erano opinioni "non in discussione": i tempi di appoggio al galoppo da quel momento in avanti risultarono essere quattro, contrariamente a quanto sino ad allora si era creduto.

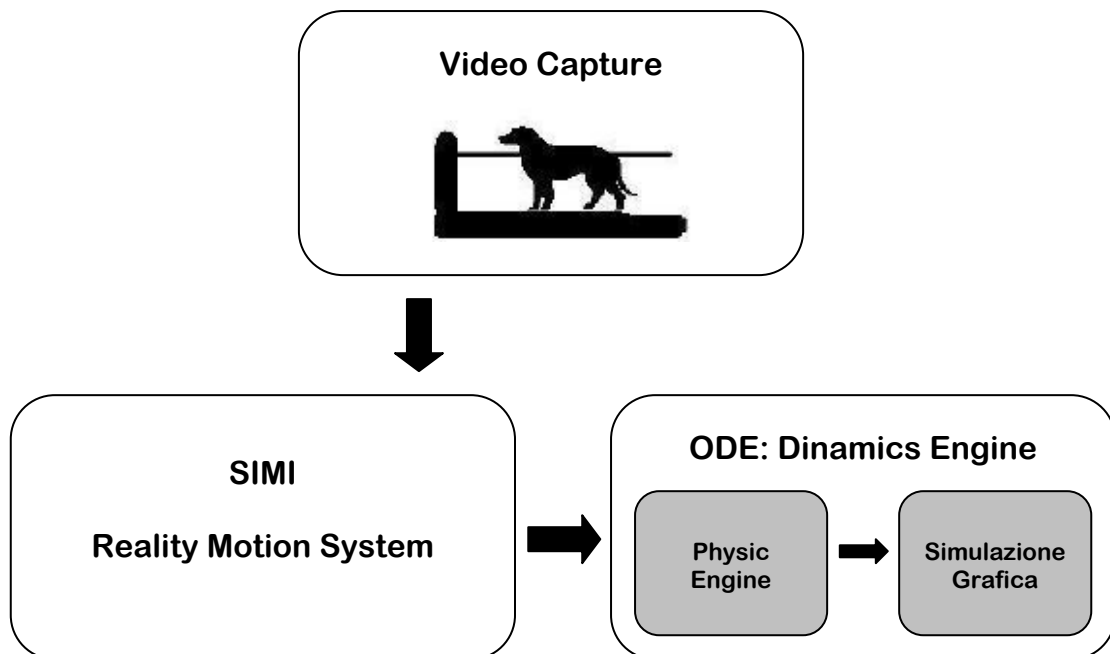


Da questo esperimento in avanti iniziarono studi, soprattutto sulle razze equine, sempre più complessi e sofisticati. Con apparecchiature elettriche si iniziò a studiare gli impulsi dell'andatura (Zwaenepoel, 1911), a misurare le forze e a relazionarle con i muscoli che le generavano.

Dobbiamo giungere sino agli anni '80, per assistere ad un fenomeno rivoluzionario simile a di quello con cui Muybridge ha cambiato l'analisi delle andature, la

comparsa di nuove tecnologie in cui il computer e tutta l'informatica in genere hanno fatto la parte del leone, hanno rivoluzionato completamente il modo di approccio e di studio del movimento. L'informatica ha permesso di quantificare in modo continuo sia lo studio del movimento (*cinematica*) sia lo studio delle forze che lo generano (*cinetica*) e per quanto riguarda il mondo dei viventi ha dato origine ad una nuova scienza "**La Biomeccanica**".

In questi ultimi anni le misure cinetiche e cinematiche sono state usate nel mondo animale (ma ancora di più in studi sull'umano) come metodi oggettivi e riproducibili per valutazioni sull'andatura e sugli effetti che alcuni interventi chirurgici e terapeutici hanno su di essa. La cinematica delle giunture degli arti è stata descritta sia in cani sani, sia in cani con patologie ortopediche. In questi studi sono state valutate le variazioni cinematiche delle giunture, utilizzando le variazioni angolari dei cicli di andatura, le velocità ed accelerazioni angolari e lineari delle parti distali e prossimali degli arti (*Stick*).



Introduzione

Molti aspetti della locomozione animale sono ancora misteriosi, si sta incominciando solo ora, usando nuove tecnologie, a comprenderne i meccanismi ed a descriverne i complessi movimenti.

Tutti i movimenti, partendo da quelli degli arti fino ad arrivare a quelli del capo hanno un comune punto di collegamento “la colonna vertebrale”. Questa struttura ossea contenente il midollo osseo e quindi tutto il sistema nervoso, non è solo un contenitore di neuroni, ma una vera e propria struttura portante per tutto l’apparato scheletrico. Non dobbiamo dimenticare che nei processi evolutivi di tutti i vertebrati, prima è nata la colonna vertebrale e poi solo in un secondo momento si sono aggiunti gli arti come appendici e questi hanno dovuto adattarsi alla struttura preesistente o viceversa. La colonna vertebrale per motivi fisici, fisiologici ed anatomici non è di



per sé una struttura rigida che funziona solo da collegamento fra la parte posteriore ed anteriore del corpo, ma è formata da segmenti, le vertebre, che potremmo simulare, in una struttura meccanica, come

una serie di giunti, tenuti uniti tra di loro da tessuti, cartilaginei e muscolari, che forniscono una flessibilità che permette un certo numero di movimenti più o meno ampi nello spazio.



Esiste una differenza fondamentale tra la colonna vertebrale di un essere umano e quella di un cane: possiamo notare come la colonna negli esseri umani sia posta perpendicolare al suolo mentre nei quadrupedi è posta parallelamente. Nei bipedi non partecipa allo spostamento in modo diretto mentre nei quadrupedi è un asse di collegamento tra zampe anteriori e quelle posteriori, che sono i propulsori del

movimento. La colonna vertebrale diventa parte attiva nello spostamento stesso flettendosi e distendendosi nel galoppo del cavallo, del cane o del gatto e in tutti gli animali che galoppano.

Quando un animale a due gambe (uomo), inizia a camminare, deve gettare il suo corpo in avanti per potersi spostare, così l'avanzamento per l'uomo inizia con una caduta.

Accettare che accada la stessa cosa negli animali a quattro zampe non è sempre vero. Durante una camminata lenta dei quadrupedi il centro di gravità si trova nel triangolo di supporto quando inizia camminare, la caduta in avanti quindi non avviene.

Una classificazione di Garbarayan (Dog Locomotion and Gait Analysis) i cani sono definiti come altri animali *cursori* cioè adatti a correre con velocità e durata. A loro volta i cursori sono stati suddivisi in animali che si spostano mantenendo la schiena relativamente rigida - *dorso stabili* - tipico degli erbivori ed animali che possiedono una colonna vertebrale flessibile utilizzata nel movimento - *dorso mobili* - tipico di tutti i carnivori.

I movimenti della colonna vertebrale sono abbastanza evidenti in animali dorso mobili sia ad andature veloci che ad andature lente (che rappresenta il tipo di locomozione più frequentemente usato). In queste ultime andature la colonna vertebrale fornisce un qualche contributo al movimento o risulta essere una struttura abbastanza statica?

Da osservazioni visive si può notare come i carnivori, in generale, quando camminano tendano a spostare lateralmente la colonna vertebrale con un movimento che potrebbe in un certo senso assomigliare “alla tecnica di movimento di un serpente”. In alcune razze canine tipo i molossoidi, tra cui i Boxer, nel movimento al passo, sembrerebbe che gli animali tendano a spostarsi in diagonale, con il bacino non allineato con il capo e tutto il movimento della colonna vertebrale sembrerebbe essere molto basculante. Come si è detto in precedenza queste sono osservazioni visive, ma come ben sappiamo, per l'occhio umano ciò che vediamo non sempre corrisponde alla realtà.

Scopo della ricerca

Tenuto conto delle considerazioni espresse nell'introduzione, con questo lavoro si è cercato di analizzare la biomeccanica della colonna vertebrale in animali dorso mobili.

Nei cani, l'esame clinico della colonna toracico-lombare durante gli accertamenti ortopedico e neurologico è fortemente influenzato dalla soggettiva abilità del clinico. Tecniche diagnostiche per immagini come le radiografie, tomografia computerizzata e risonanza magnetica forniscono oggettive informazioni sui cambiamenti morfologici, ma sono inadeguate per accertare eventuali progressi clinici.

Queste tecniche diagnostiche hanno una caratteristica limitante: le informazioni fornite provengono da soggetti statici e servono ad individuare un'eventuale patologia, ma non riescono a quantificare le ricadute che questa può avere sui soggetti stessi.

Studi fatti in vitro sia su giunture articolari, sia su punti di giunzione di parti della colonna vertebrale, non tengono conto delle influenze che i tessuti molli (tessuto muscolare e tessuto cartilagineo) hanno sul movimento quando artificialmente vengono applicate delle forze.

Come risultato, gli studi fatti in vitro, hanno dimostrato proprietà diverse da quelle fatte in vivo.

Molti studi sia cinetici che cinematici sono stati fatti sulle articolazioni delle estremità canine usando metodi non invasivi, ed in particolare utilizzando markers posizionati sopra le prominenze ossee degli arti.

Nonostante ci sia un'ampia letteratura sulla cinematica degli arti, per quanto riguarda il movimento della colonna vertebrale in razze canine, la letteratura è molto scarsa o quasi nulla.

Si conoscono studi, fatti utilizzando gli *skin markers*, per quanto riguarda gli equini o studi fatti sull'uomo, ma studi fatti su razze canine devono ancora essere sviluppati.

Gli scopi che hanno portato a questo studio sono molteplici:

- cercare di verificare attraverso parametri oggettivi (sequenze di immagini, filmati, acquisizione di dati in vivo ed elaborazione degli stessi) con l'uso di sistemi informatici se questo movimento tridimensionale della colonna

vertebrale è un dato reale e non un artefatto dovuto alla limitatezza dell'occhio umano;

- cercare di ottenere, attraverso elaborazioni informatiche, dati numerici del movimento complessivo di tutta la colonna vertebrale; ci sono studi cinematici del movimento della colonna vertebrale ma questi sono limitati a porzioni della stessa, non al suo movimento in toto;
- cercare, se esiste, una logica nel movimento delle varie vertebre; analizzare come si muove ogni singola vertebra e studiare sempre attraverso parametri numerici come queste possano interagire tra di loro; logicamente, penso si possa affermare, che essendo la colonna vertebrale formata da una serie di giunti, il movimento di una qualsiasi vertebra può essere condizionato e può condizionare quello di tutte le altre;
- cercare, attraverso librerie software come Open Dynamics Engine (ODE), il cui principale utilizzo è la realizzazione di simulazioni interattive di strutture articolate di corpi rigidi mediante vincoli meccanici, di simulare su principi fisici un modello virtuale del movimento della colonna vertebrale.

Lo studio è stato fatto in collaborazione con la Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Parma.

Capitolo 2

Materiali e metodi

2.1 Soggetti cani analizzati

La scelta dei soggetti motivo dello studio non è stata casuale, ma ha seguito alcuni criteri, che dall'inizio sono sembrati importanti per una buona riuscita del lavoro.

- L'uomo durante la sua lunga convivenza con i cani ne ha selezionato diverse razze.
- Animali di taglia piccola, animali di taglia media e animali di grandi dimensioni. Di tutte le razze selezionate sono state esasperate a volte alcune caratteristiche fisiche e morfologiche in modo da renderli più utili ai compiti a cui erano stati assegnati.
- Cambiando queste caratteristiche, molto probabilmente, cambiano anche le andature degli animali, non rendendole uniformi. E' chiaro che un Bassotto cammina in modo diverso da un Alano, in quanto le proporzioni tra arti e colonna spinale sono molto diversi. Gli ibridi anch'essi mostrano una variabilità insita nel loro codice genetico.
- Da qui la necessità di lavorare su di una razza sola, che dia garanzie di maggior uniformità durante la raccolta dei dati fonte dello studio.
- Tra tutte le razze disponibili si sono escluse a priori quelle di taglia troppo piccola (presentano problemi nell'individuazione delle vertebre interessate e successivamente nell'applicazione delle sfere - *markers* - e anche di riprese con le video camere). Si sono esclusi quegli animali di taglia troppo grande (presentano problemi di movimento sul tread-mill) in quanto non siamo in possesso di una macchina sufficientemente grande per poterli far muovere con naturalezza. Razze di taglia media si adattano molto meglio alle esigenze dello studio.

- Tra le razze di taglia media si è scelto i cani di razza Boxer, per alcune ragioni:
 - 1) sono animali facilmente reperibili con standard di razza molto ben definiti
 - 2) sono animali a pelo corto, quindi non si presentava la necessità di rasarli al momento dell'applicazione dei markers (i proprietari sono restii)
 - 3) sono animali di carattere docile e facilmente gestibili anche in condizioni particolari come il muoversi su di uno strumento come il tread-mill
 - 4) la ragione più importante è che presentavano un movimento della colonna spinale ampio e ben visibile anche a occhio nudo e quindi facilmente quantificabile.



- La campionatura doveva essere equamente distribuita tra animali dei due sessi. La difficoltà nel reperire cani di sesso maschile ne ha ridotto il numero.
- Sono stati campionati dieci cani di sesso femminile e quattro di sesso maschile.
- Le caratteristiche morfologiche tra i due sessi sono abbastanza evidenti. Conseguentemente sono stati formati due gruppi divisi per sesso. In questo studio ci si è concentrati solo su animali di sesso femminile, in quanto la campionatura di quelli di sesso maschile era ritenuta di numero insufficiente (alcuni campioni sono stati scartati in quanto non fornivano dati attendibili).

All'interno dei dieci soggetti di sesso femminile se ne sono utilizzati sei e quattro sono stati scartati in quanto non davano garanzie sull'attendibilità dei dati forniti.

2.2 Dove applicare i markers

La ricerca prevede lo studio del movimento di tutta la colonna vertebrale escludendo le vertebre cervicali.

Tutte le vertebre sono interessate dal movimento ed essendo unite come dei giunti, il movimento di ognuna va a condizionare quello di tutte le altre.

Non potendo, per motivi spaziali e anche per cercare di semplificare lo studio, analizzare tutte le vertebre, si è deciso di marcarne con le sfere retroriflettenti solo alcune.

I criteri di scelta sono stati:

- 1) dividere la colonna vertebrale in segmenti aventi la stessa lunghezza.

Si è scelto di collocare nella parte toracica i markers ogni tre vertebre.

Vertebra T1 (prima toracica), situata tra le scapole degli animali, è stato il punto di riferimento per il posizionamento dei markers sulle vertebre successive.

Vertebra T3 (terza vertebra toracica) alla distanza di circa 3cm.

Vertebra T6 (sesta vertebra toracica) alla distanza di circa 3cm.

Vertebra T9 (nona vertebra toracica) alla distanza di circa 3cm.

- 2) avvicinandoci alla fine delle vertebre toraciche e all'inizio delle vertebre lombari si è deciso di ridurre le distanze fra i markers. Le vertebre di questi due tratti della colonna spinale presentano caratteristiche differenti. Fondamentalmente le vertebre toraciche sono unite alle coste, che insieme allo sterno, costituiscono la gabbia toracica (una struttura con funzioni protettive e quindi con una certa rigidità). Le vertebre lombari costituiscono invece una struttura più fluttuante, in grado di esprimere movimenti più ampi.

La fine delle toraciche e l'inizio delle lombari, costituisce come una specie di snodo tra due strutture con caratteristiche e funzioni diverse, questo punto è meritevole di studi più dettagliati e approfonditi.

Vertebra T11 (undicesima vertebra toracica). La distanza con che la vertebra che la precede è di due cm circa.

Vertebra T13 (tredicesima vertebra toracica). Questa vertebra è l'ultima delle toraciche ed ha la caratteristica di essere vincolata ad una costa fluttuante. Si trova ad una distanza di 2 cm circa.

Vertebra L1 (prima vertebra lombare). E' direttamente connessa alla vertebra T13, alla distanza di 1 cm circa.

Vertebra L3 (terza vertebra lombare). Dal punto di vista anatomico le lombari risultano leggermente più lunghe delle toraciche. Per mantenere la stessa distanza tra un marker e il successivo si è deciso di porre i markers ogni due vertebre. Distanza 3 cm circa.

Vertebra L5 (quinta vertebra lombare) alla distanza di circa 3 cm.

Vertebra L6 (sesta vertebra lombare). Per il marker posizionato su questa vertebra, vale lo stesso discorso fatto per T13-L1. Essendo un punto di snodo tra vertebre con caratteristiche e funzioni diversi (lombari e sacrali), si è deciso di raccogliere una quantità di dati maggiore.

Vertebra S (vertebra sacrale). In verità nei cani sono tre ma saldate fra di loro a formare un blocco unico. Si è deciso di porle nella porzione prossimale alle sacrali. Distanza 1 cm circa (vedi figura 2.1).

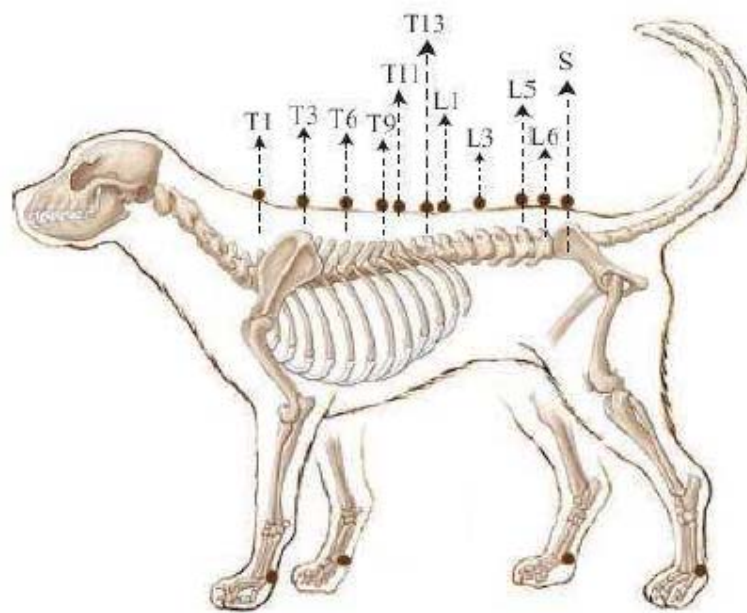


Figura 2.1 Struttura scheletrica canina e vertebre monitorate

2.3 Come applicare i markers

L'applicazione dei marker è un momento molto importante nell'utilizzo di metodi di studio non invasivi e costituisce uno dei maggiori problemi nei processi di studio cinematici, in quasi tutte le parti degli esseri viventi. Il problema più evidente è costituito dall'involucro che ricopre le parti interne e riveste la struttura scheletrica: la pelle. La sua capacità di accorciarsi ed allungarsi, a seconda delle esigenze, non seguendo lo spostamento delle ossa nel loro movimento, è stato argomento di studio in molti lavori. Questo sicuramente risulta essere una fonte di errore in tutti gli studi che utilizzano sistemi di analisi cinematiche non invasive. Mentre nei cavalli queste variabili sono state studiate, calcolate e corrette con software adeguati, nei cani questo lavoro non risulta essere stato ancora fatto. L'applicazione dei marker sulle vertebre della colonna, prese in considerazione, ha presentato non pochi problemi. L'influenza dei movimenti della testa degli animali ha un forte impatto sull'escursione della pelle, specialmente nella zona delle vertebre toraciche, che sono quelle ad essa più vicine. L'errore di scostamento di un marker posizionato sulla vertebra T1 con l'animale avente la testa piegata o la testa eretta, è stato stimato

anche in 4 cm. L'errore di posizionamento dei marker dovuto all'escursione della pelle, tende a diminuire man mano che ci si allontana dalla zona craniale, sino a risultare ininfluenza nelle ultime vertebre lombari e in quelle sacrali. Una prima parte del lavoro è consistita nell'individuare la posizione, soprattutto della testa, che gli animali assumevano durante il movimento sul treadmill. I cani pur se addestrati, quando si muovono su un terreno innaturale, hanno bisogno di una certa concentrazione e tutti tendono ad abbassare la testa guardando verso il basso. Applicando 3 markers, uno sulla vertebra T13, uno sulla vertebra T1 e uno posto sul cranio, si è misurato l'angolo che i tre marker formavano tra di loro quando l'animale camminava alla velocità di 2.5 km/h sul treadmill. Le misure ottenute sono state mediamente di $204^\circ \pm 4$. Questa misurazione si è rivelata importante al momento del posizionamento dei marker sulle vertebre di riferimento. Questi sono formati da semisfere di circa 1,5 cm ricoperte di una sostanza retroriflettente (semisfere per allargare il punto di appoggio ed evitare eventuali oscillazioni che potrebbero avere le sfere durante il movimento). Le semisfere sono fissate al corpo dell'animale utilizzando del nastro biadesivo. Prima di individuare le vertebre interessate dallo studio è importante mettere l'animale in posizione stazionaria e piegargli leggermente la testa verso il basso misurando all'incirca (con un angolo precostruito) i 204° . Per individuare i punti di repere si è sempre partiti dalla 13° vertebra toracica (la più facile da individuare seguendo l'ultima costa fluttuante della gabbia toracica) e da questo punto in avanti si è andati ad individuare le vertebre successive interessate dallo studio. Inizialmente i punti di repere sono stati marcati con lettere di piombo per poterne testare il corretto posizionamento usando un esame radiologico utile anche per individuare eventuali patologie (spondilosi o sublussazioni) della colonna vertebrale.

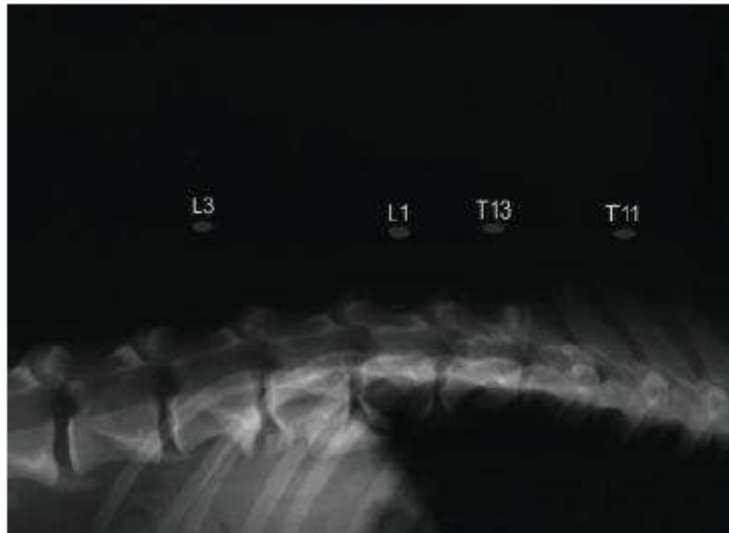


Figura 2.2 Radiografia della sezione della colonna spinale per verificare l'allineamento fra marker e vertebra

Al termine di questa operazione le lettere di piombo sono state sostituite con le semisfere retroriflettenti. Un'altra fonte di errore è dato dalla forma irregolare delle vertebre che presentano numerosi processi spinosi sia verticali che orizzontali, specialmente nelle vertebre toraciche.



Figura 2.3 Vertebre irregolari

Per ovviare a questo errore, essendo difficile individuare il punto esatto, si è scelto di approssimare, considerando la vertebra compresi i suoi processi spinosi, come facenti parti di una struttura di forma cilindrica, e quindi si è cercato di individuare solamente il corpo della vertebra.

Eventuali errori di posizionamento all'interno della vertebra stessa dovrebbero essere nell'ordine dei millimetri, abbastanza piccoli da non influenzare significativamente misurazioni fatte nell'ordine dei centimetri.

2.4 Definizione di piano sagittale mediano

Il corpo degli animali vertebrati presenta una conformazione che corrisponde al tipo della Simmetria Bilaterale.

In posizione normale, quando cioè l'animale è con i quattro arti sul terreno mentre la testa e il collo sono naturalmente diretti verso l'avanti, il corpo può essere diviso longitudinalmente dal Piano Sagittale Mediano in due parti o (antimeri), una destra e l'altra sinistra, pressoché uguali.

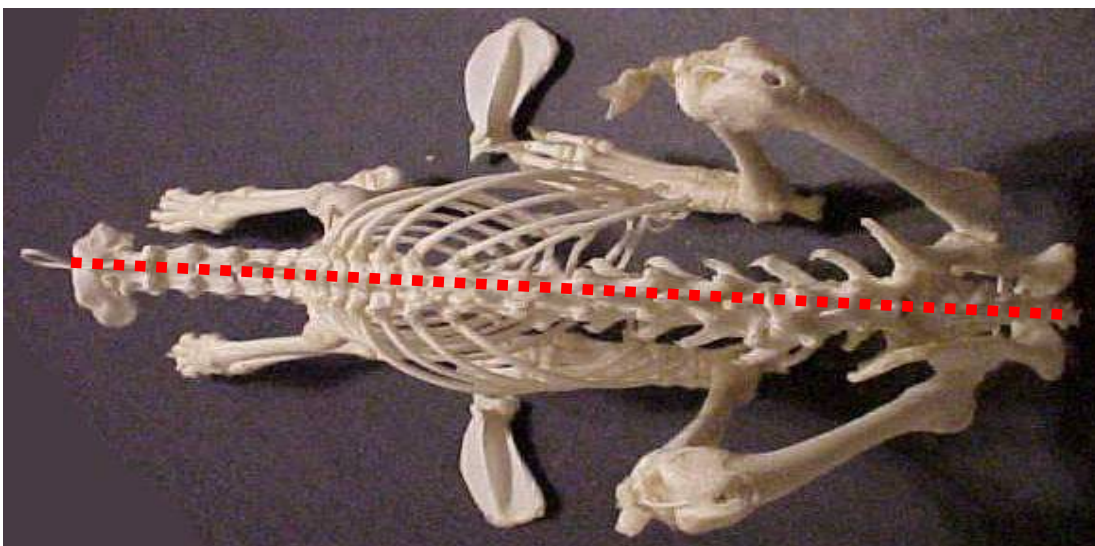


Figura 2.4 Piano sagittale

2.5 Treadmill

Le immagini del movimento dei cani sono state registrate in un ambiente isolato, per non distrarre gli animali durante l'esperimento. Per tutti i campioni è stato usato un treadmill "Grillo" a variazione graduale di velocità. Prima delle misurazioni i cani venivano acclimatati, in modo da cercare di ridurre a minimo l'impatto emotivo, dovuto sia al nuovo ambiente sia all'uso di uno strumento innaturale per i loro spostamenti (gli animali erano guidati dai rispettivi proprietari che lasciavano il guinzaglio molle in modo da non influire sia sulla postura che sul movimento). Quando, nel limite del possibile, si riteneva che l'animale fosse pronto, veniva posizionato e mantenuto al centro del treadmill, in modo da poter essere ripreso dalle video camere in posizione ottimale. La velocità veniva gradualmente aumentata, si valutava l'assetto dell'animale e molto lentamente si raggiungevano i 0.69 m/s (passo lento). Quando si raggiungeva la velocità stabilita e l'animale aveva un'andatura lineare si dava inizio alle riprese con video camere. La stessa procedura veniva seguita per registrare le immagini ad una velocità di 1.1 m/s (passo veloce).



Figura 2.5 Treadmill

Alcune considerazioni:

Non tutti gli animali riuscivano a muoversi con un'andatura simile a quella naturale e quindi non sono stati presi in considerazione, anche se i loro dati sono stati digitalizzati, non sono stati inseriti nel campione studiato.) Un dato soggettivo quindi senza nessuna valenza scientifica, è che tra le variabili imponderabili ci sia anche quella psicologica, trattandosi comunque di esseri viventi. Non tutti i soggetti affrontavano, pur nei limiti della normalità, il movimento con la stessa naturalezza, alcuni apparivano più contratti, altri più sciolti: spesso sembrava dipendere dal proprietario.

2.6 Risoluzione della telecamera

Quando si utilizza una telecamera, un'immagine della realtà è copiata da una serie di immagini fotografiche.

Questo è soggetto alle seguenti restrizioni:

- gli oggetti tridimensionali sono rappresentati su un singolo piano;
- la grandezza di queste rappresentazioni sul piano non è quella originale;
- la registrazione non è continua, ma è effettuata ad intervalli di tempo;
- per ogni immagine, la telecamera mette a fuoco tutta la luce che arriva attraverso la lente in un certo intervallo di tempo (tempo di esposizione); il tempo di esposizione deve essere impostato il più breve possibile per registrare un movimento, altrimenti l'oggetto in considerazione si muove troppo durante il tempo di esposizione e da ciò consegue un'immagine "mossa" (in questo studio è stato utilizzato un tempo di esposizione di 1/500 di secondo);
- l'intervallo di tempo tra un quadro e il successivo è allora relativamente lungo (50 quadri per secondo significa che ogni immagine è presa ogni 0.020 sec., in un tempo di esposizione di 0.002 sec., e l'oggetto è lasciato nel buio per 0.018 sec.; ogni informazione sul movimento durante l'intervallo tra le due immagini è persa e può essere solo stimata; questa è la risoluzione

temporale della telecamera utilizzata (più alta è la risoluzione temporale, più informazioni sono disponibili);

- la risoluzione locale della videocamera e le dimensioni dell'area in considerazione sono responsabili in maniera notevole dell'esattezza della registrazione delle coordinate: se assumiamo che la videocamera possa registrare un'area di 7 m in larghezza, allora, usando una normale risoluzione di 768x576, un pixel corrisponde ad un centimetro; è possibile ottenere misure in un ambito di sub pixel usando appropriati processi di analisi dell'immagine, ma a seconda del sistema usato una discrepanza di alcuni millimetri deve comunque essere accettata.

2.7 SIMI Motion

Simi Motion è un software di motion capture ed analisi del movimento; consta di due moduli, “ 2D o 3D kinematics” (analisi del movimento imaged based) ed “inverse dynamics”, entrambi compatibili con DV multipli e videocamere high speed.

I moduli sono integrati in un'intuitiva interfaccia (vedi figura 2.6) che include anche reports, calcoli aritmetici, filtering, smoothing ed extensive export (C3D, text, DXF e file 3DStudio, Poser, Maya etc.).

Simi motion supporta video capturing simultaneo su sistemi Window (2000 o superiori) di sei o più videocamere DV o Firewire high speed; i dati vengono acquisiti ed immediatamente e automaticamente sincronizzate con il video.

I video vengono jan-locked da un software, che corregge gli scarti temporali delle videocamere.

E' anche possibile lavorare su filmati precedentemente salvati grazie alla compatibilità con i più comuni formati video (AVI, MPEG, Quicktime) ed immagini (BMP, TIFF, JPEG etc.).

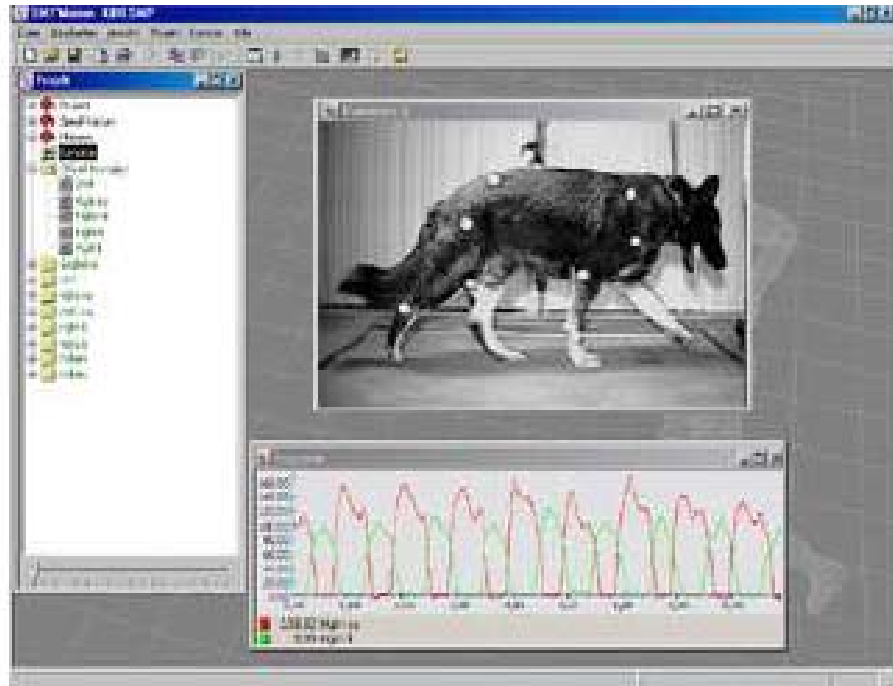


Figura 2.6 Interfaccia grafica user-friendly dell'ambiente di sviluppo SIMI

Sulle orme della medicina classica, l'analisi biomeccanica ha assunto un ruolo fondamentale in molteplici ambiti della medicina veterinaria, come la chirurgia, la ricerca e la riabilitazione fisioterapica.

A tale fine SIMI motion assicura un'ampia gamma di strumenti di rilevazione e parametri specifici quali calcolo degli angoli, velocità ed accelerazioni angolari, distanze lineari con relative accelerazioni, centri di massa ed altri dati addizionali.

Capitolo 3

L'analisi di immagini

Paragonato ad altri metodi di misura, l'analisi di immagini ha il vantaggio di non avere ripercussioni dirette sul comportamento dell'oggetto misurato (espresso in termini fisici: nessuna energia è sottratta dall'oggetto dalla misurazione).

Questo perché la misurazione non è attuata sull'oggetto stesso ma su un'immagine dell'oggetto.

La tecnica di misurazione è quindi la più semplice, ma presenta uno svantaggio: un oggetto tridimensionale è rappresentato in due dimensioni.

Questo svantaggio è accettabile solo se le due dimensioni sono di interesse per lo studio che si sta attuando (la misura di un angolo di un'articolazione o lo spostamento riferito al piano su cui lo stesso avviene).

Quando si registrano tali movimenti è importante che essi possano essere completamente descritti utilizzando un singolo piano.

Le dimensioni fisiche registrate da queste misurazioni sono: distanza, tempo, velocità, accelerazione, angoli con le rispettive velocità ed accelerazione.

3.1 L'analisi del movimento

Il movimento è definito fisicamente come un cambiamento in coordinate in un intervallo di tempo.

Il sistema di coordinate può essere scelto arbitrariamente e successivamente fissato.

Sono necessari quindi due requisiti:

- un sistema di coordinate
- dati temporali

3.2 Il sistema di coordinate

Il sistema di coordinate è lo strumento matematico per mezzo del quale è possibile calcolare le dimensioni spaziali.



Figura 3.1 Sistema di coordinate

Ad esso è correlato il concetto di sistema di calibratura; il sistema di calibratura misura lo spazio (nell'analisi tridimensionale) o il piano (nell'analisi bidimensionale) in cui il movimento ha luogo. Per la persona che esegue la misurazione la relazione tra il sistema di calibratura e il sistema di coordinate non riveste alcuna importanza. Questa relazione è stabilita dal software che elabora i dati grezzi.

Una struttura formata da due aste ad angolo retto, di lunghezza predefinita (1 m con relativi sottomultipli) fornivano il nostro sistema di calibratura; naturalmente questa doveva essere posizionata nel luogo in cui avviene l'azione oggetto dello studio (vedi figura 3.1).

Per poter fare i calcoli necessari, bisogna fornire al sistema le reali lunghezze di entrambe le distanze e le coordinate dei punti che delimitano le distanze nel fotogramma registrato.

Le coordinate dei punti vengono registrate e quindi vengono portate fuori e rese disponibili nel sistema.

3.3 Dati temporali

I dati temporali danno informazioni sull'istante in cui è stata catturata l'immagine.

Questo dato può essere rappresentato sia come valore assoluto sia come valore relativo (0.1 secondi dopo la precedente immagine).

Nel nostro caso è stato utilizzato un valore di tempo relativo, determinato dalla frequenza di quadro del sistema (50 quadri per secondo).

3.4 Fasi di ripresa

La prima fase consiste nel posizionare il cane sul nastro del treadmill, questo partendo da velocità 0 m/s inizia a scorrere, aumentando gradualmente la velocità, in modo da mettere i soggetti da studiare nelle migliori condizioni possibili e si raggiunge la velocità di 0.69 m/s. A questo punto si attende sino a quando l'animale si è stabilizzato e si muove in sintonia con il tappeto. Raggiunti questi obiettivi iniziano le riprese con le due videocamere digitali e le registrazioni delle immagini.

Ogni registrazione dura 12 sec. per un totale di 680 frames. Al termine della registrazione i filmati (si tratta di file .avi) vengono controllati per valutare la qualità del movimento e salvati su disco o eliminati se non soddisfacenti. A questo punto si ripetono con le stesse modalità una o più prove per avere più materiale a disposizione per le fasi successive.

3.5 Cattura delle immagini

Dopo aver inserito tutte le informazioni necessarie il software effettua la cattura automatica dei punti.

Sul monitor appaiono contemporaneamente le immagini delle due telecamere ed un segnale acustico avvisa della fine della registrazione.

Verificata la qualità della registrazione si provvede al suo salvataggio su Hard Disk e poi su Compact Disk per poterlo conservare in archivio.

In una prima fase, precedente alla cattura delle immagini, è necessario fornire al software una serie di informazioni che permettono all'operatore una gestione più semplice durante la cattura dei punti interessati allo studio.

Si deve creare un progetto che prevede: la denominazione di ogni punto che deve essere catturato dal sistema, in modo da avere sotto controllo tutta la situazione, per es. la terza vertebra toracica, è stata denominata T3, la 5 vertebra lombare L5, ecc). Tutti i punti interessati allo studio sono stati collegati tra di loro da segmenti che seguivano la logica sequenza delle vertebre, usando colori diversi a secondo delle parti che si vogliono evidenziare.

Questa operazione viene fatta una sola volta all'inizio dello studio per il file relativo al primo cane studiato; poi si provvede semplicemente ad importarlo dai file precedenti ogni volta che se ne crea uno nuovo.

Ad ogni filmato è assegnato un nome con il seguente criterio: Nome del cane-Velocità del tappeto-Lato di ripresa.

I primi markers devono essere catturati manualmente, centrando le sfere retro-riflettenti con un puntatore manovrato dall'operatore attraverso il mouse, poi in genere il software procede in automatico nell'individuazione dei punti, permettendo se necessario correzioni in corso d'opera.

Alla fine di questa operazione, per ogni soggetto studiato, abbiamo ottenuto i dati grezzi (*Raw Data*).

3.6 Esame dei dati grezzi (Raw data)

I dati grezzi esprimono lo spostamento di ogni marker sui due assi orizzontali e verticali (ascissa e ordinata), del piano preventivamente determinato, in funzione del tempo (vedi figura 3.2).

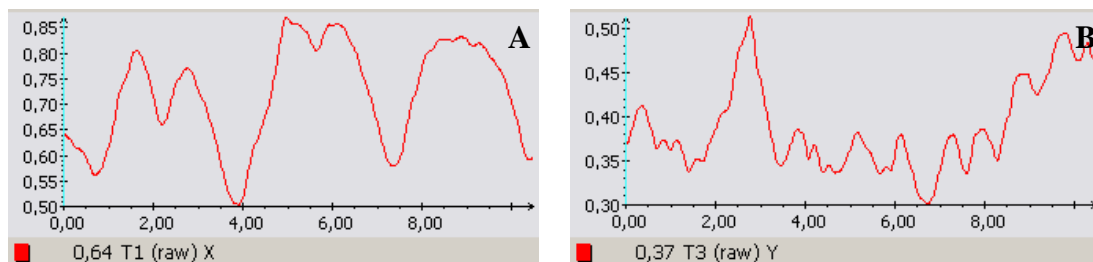


Figura 3.2

- A.** Coordinate X riferite al tempo
- B.** Coordinate Y riferite al tempo

E' già possibile fare alcune considerazioni sul movimento di ogni singola vertebra studiando i dati grezzi.

In particolare si può notare la regolarità dei movimenti delle vertebre, individuare movimenti anomali delle stesse, probabilmente dovuti a passi non regolari, valutare l'ampiezza del movimento ecc.

Questa prima fase risulta estremamente importante, poiché fornisce dati oggettivi sulla buona riuscita della prima fase dell'esperimento (registrazioni delle immagini), che in prima istanza fornivano solamente informazioni soggettive, con tutte le limitazioni legate insite nell'occhio umano dell'operatore.

3.7 Calcolo delle coordinate 2-D

Le coordinate 2-D sono calcolate automaticamente dal software.

Il calcolo si può effettuare sia utilizzando i dati standard sia utilizzando i dati filtrati. E' possibile scegliere quale tipo di filtro utilizzare: "moving average filter", "low pass filter", "low pass filter", "spline filter".

In questo studio abbiamo utilizzato dati standard, in quanto in questa prima fase abbiamo evitato tutte le approssimazioni che l'uso di un filtro comporta.

3.8 Rappresentazione dei dati

Esistono due modi per rappresentare i dati.

La prima possibilità consiste nella rappresentazione di segmenti che uniscono i punti di repere, in cui il movimento può essere riprodotto mediante la *stick figure* (vedi figura 3.3) e l'esecuzione del movimento può essere continuamente monitorato.

Mediante la visione della *stick figure* in movimento l'esecuzione degli spostamenti possono essere enfatizzati e le eventuali possibili anomalie o particolarità sono evidenziabili.

Il secondo metodo consiste nel presentare i dati in forma di grafico e analizzare le curve risultanti.

Un terzo metodo permette di esportare i valori numerici ottenuti su di una tabella Excel pronti per ulteriori elaborazioni ed analisi.

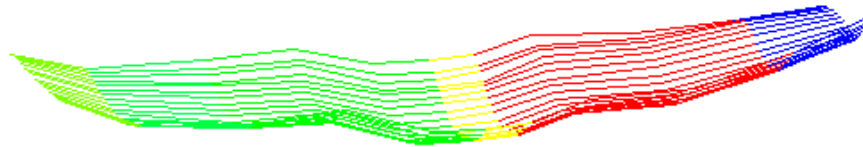


Figura 3.3 Stick figure

3.9 Come rappresentare i dati

Dopo aver rilevato i filmati, il programma SIMI è in grado, per ogni fotogramma, di individuare i punti marcati applicati alla pelle dell'animale, con le semisfere retroriflettenti (di diametro di 1,5 cm circa) e trasportarli come coordinate sul piano cartesiano, precedentemente definito con la calibratura.

Le riprese sono state fatte utilizzando due videocamere.

La prima videocamera è posizionata perpendicolarmente sopra il cane per misurare le coordinate (x, y) dei markers sul piano assiale.

La seconda è posta trasversalmente (parallela al piano sagittale) e si occupa della misurazione degli scostamenti verticali sull'asse z.

Dalle prime analisi di questi dati, è emerso che i valori degli scostamenti maggiormente significativi sono quelli rilevati lungo l'asse delle y.

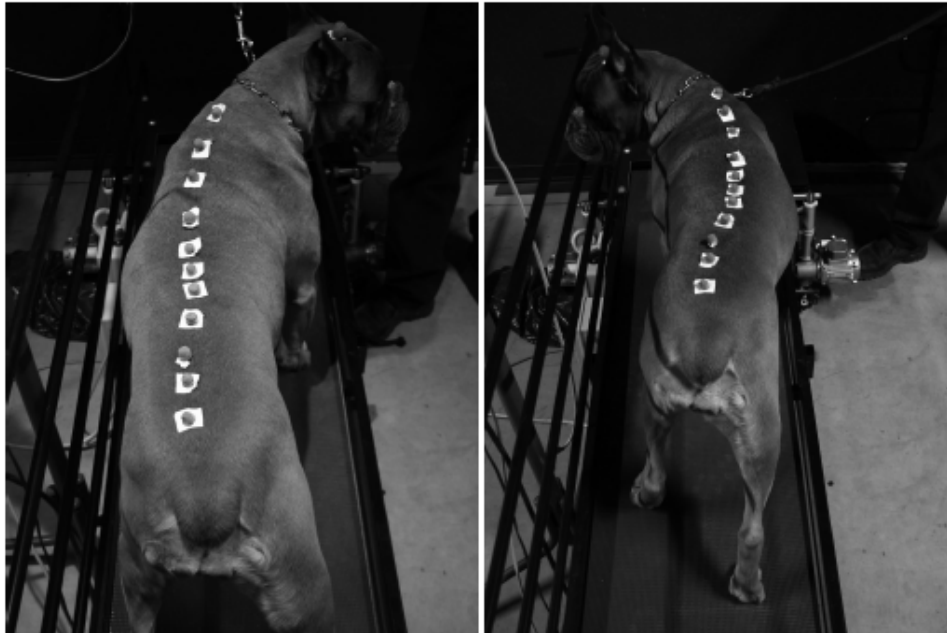


Figura 3.4 Posizionamento dei marker sul soggetto

Per tale motivo si è deciso di circoscrivere l'analisi alle vertebre lungo l'asse y, tralasciando il contributo verticale (il contributo verticale oltre ad essere molto meno significativo, presentava anche problemi di gestione dati; i valori sono comunque disponibili).

Di ogni punto di reperi, di ogni fotogramma, il sistema fornisce, sia graficamente sia come sequenza di dati numerici, i valori delle ascisse e quelli delle ordinate.

Calcolati questi valori, il programma li trasforma in distanze espresse in cm, in rapporto con il tempo calcolato per ogni fotogramma, che è di 0.02 sec..

I valori delle distanze ottenuti, sono riferiti agli assi cartesiani precedentemente definiti.

Ogni vertebra segue quindi i movimenti del cane fonte di studio, sul piano.

Se ci fossimo accontentati di questi dati, avremmo ottenuto dei risultati parziali difficilmente analizzabili e confrontabili, in quanto i soggetti che stanno camminando

sul treadmill, si muovono avanti e indietro trascinati dal nastro, con spostamenti laterali.

Il sistema con alcune operazioni, permette di spostare l'origine degli assi cartesiani in altri punti del piano inizialmente definito.

Nello studio si è deciso di collocare l'origine degli assi sulla vertebra T1 (prima toracica), situata al centro delle scapole. Se la vertebra T1 avanza, tutta la colonna spinale la segue nel suo movimento, ma la seguono anche gli assi del nuovo piano.

Partendo da questa nuova origine è stata calcolata una retta parallela all'asse delle ascisse, inizialmente definita con la calibratura, che individua il piano sagittale mediano dell'animale (vedi figura 3.5).

A questo punto il movimento delle vertebre, riferito al nuovo sistema di assi, non risulta più essere condizionato dal movimento del cane ma si riferisce solo ed unicamente al movimento della vertebra T1, che risulta essere l'origine del nuovo piano. Praticamente otteniamo come risultato che il cane risulta fermo, mentre tutte le vertebre, eccetto la T1, si spostano attorno alla nuova ascissa che risulta essere il piano sagittale.



Figura 3.5 Visualizzazione scostamenti dal piano sagittale

In questo modo riusciamo a calcolare il movimento in cm delle vertebre fuori dello studio.

Operando in questo modo, otteniamo valori sia positivi che negativi, a seconda che la vertebra si trovi sul piano positivo o negativo degli assi cartesiani.

Poiché la vertebra T1 (origine degli assi) si trova nelle prossimità del cranio e quindi nel senso di avanzamento del cane e il piano sagittale divide l'animale in due parti

simmetriche, si definisce come parte sinistra (Sx) dell'animale quella che ci fornisce valori negativi, mentre la parte destra ci fornisce i valori positivi. Quando si ottiene un valore uguale a zero significa che il marker si trova in quel momento sul piano sagittale e quindi perfettamente in linea con la vertebra T1. Se sommiamo tutti i valori ottenuti e questi forniscono una somma negativa, significa che la fonte dello studio è maggiormente spostata a sinistra, se i valori sono positivi è maggiormente spostata a destra.

3.10 Taglio in fasi

I dati ottenuti vengono rappresentati con un grafico espresso in cm/tempo, che rappresenta tutti i movimenti della spina dorsale del cane durante una ripresa.

Si presenta come una sequenza di curve distribuite sia sulla parte positiva sia sulla parte negativa dell'asse delle ascisse.

Il taglio in fasi consiste nell'identificare e isolare ogni fase del ciclo del movimento della colonna vertebrale che corrisponde ad un passo da parte del cane, per poi eseguire tutti i confronti necessari.

E' possibile dividere le fasi del movimento in posata, levata, fase di appoggio e fase di sospensione degli arti. In questo studio si è preferito identificare il ciclo di movimento della colonna vertebrale indipendentemente da quello degli arti (vedi figura 3.6).

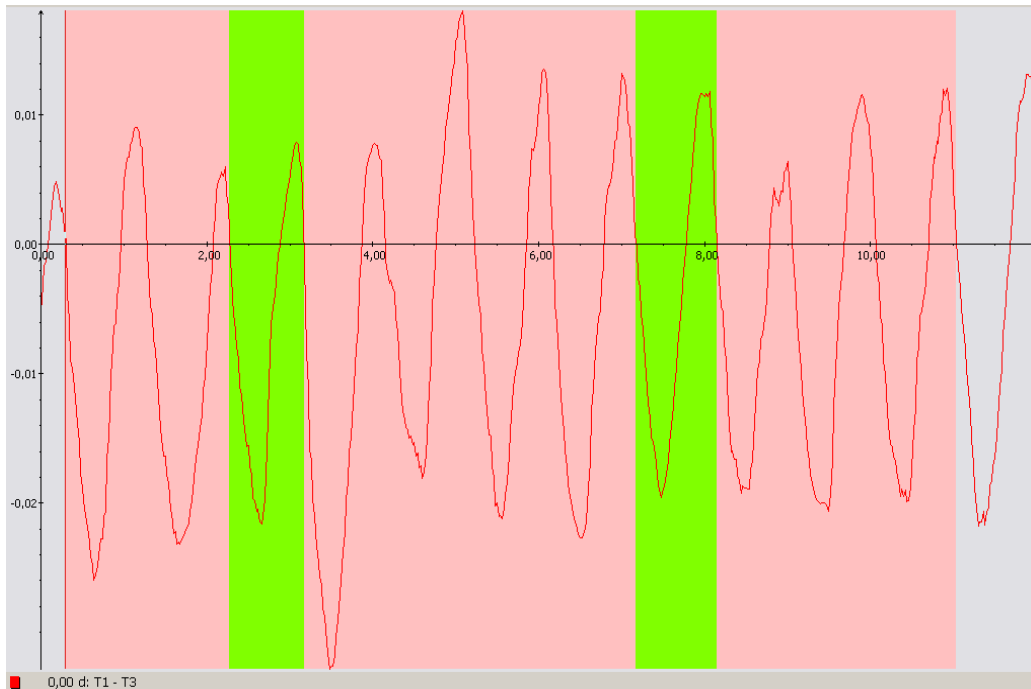


Figura 3.6 Esempio di taglio in fasi del movimento della vertebra T3 verso T1

Tutti i cicli di tutte le vertebre hanno un comune punto di partenza: l'allineamento della vertebra T1 con la vertebra T3.

Questo sta a significare che il primo ciclo inizia quando la prima vertebra toracica T1 è allineata lungo una parallela all'asse delle X (che corrisponde al piano sagittale del cane) con la terza vertebra toracica T3.

Da questo punto in avanti la vertebra T3 proseguirà nel suo movimento sino a completare il suo ciclo, per poi riallinearsi alla fine con la vertebra T1, per iniziarne uno successivo.

Questo percorso della vertebra T3 rispetto alla T1 viene definito come **ciclo del movimento della colonna vertebrale**.

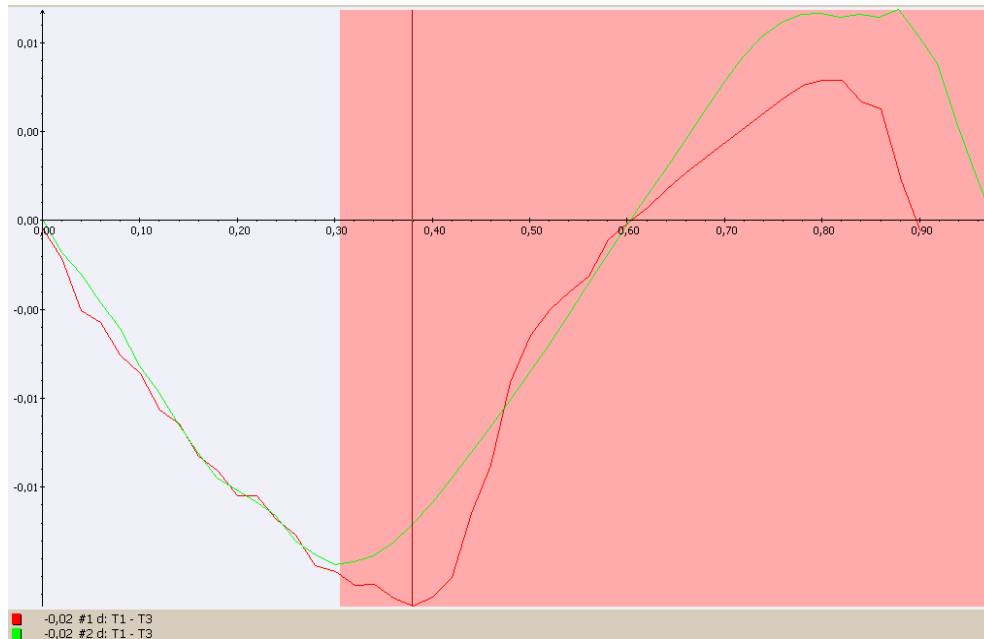


Figura 3.7 Taglio di 2 cicli della vertebra T3 verso T1

I cicli delle vertebre successive, iniziano quando inizia quello della vertebra T3. Questo ci permette di calcolare i loro tempi di allineamento con il piano sagittale rispetto alla T3.

Come è facilmente intuibile, essendo il movimento della spina dorsale, un movimento di tipo ondulatorio, i vari punti che compongono l'onda durante il loro movimento intersecano la retta parallela all'asse X che la taglia trasversalmente in momenti diversi.

Questo accorgimento ha permesso di valutare oltre agli spostamenti spaziali di ogni singola vertebra e anche i tempi con cui questi avvengono rispetto a quella che si è presa come riferimento.

Il conoscere i tempi di esecuzione degli spostamenti di ogni vertebra rispetto a tutte le altre può permettere una migliore descrizione del movimento della colonna spinale nel suo complesso (vedi figura 3.8).

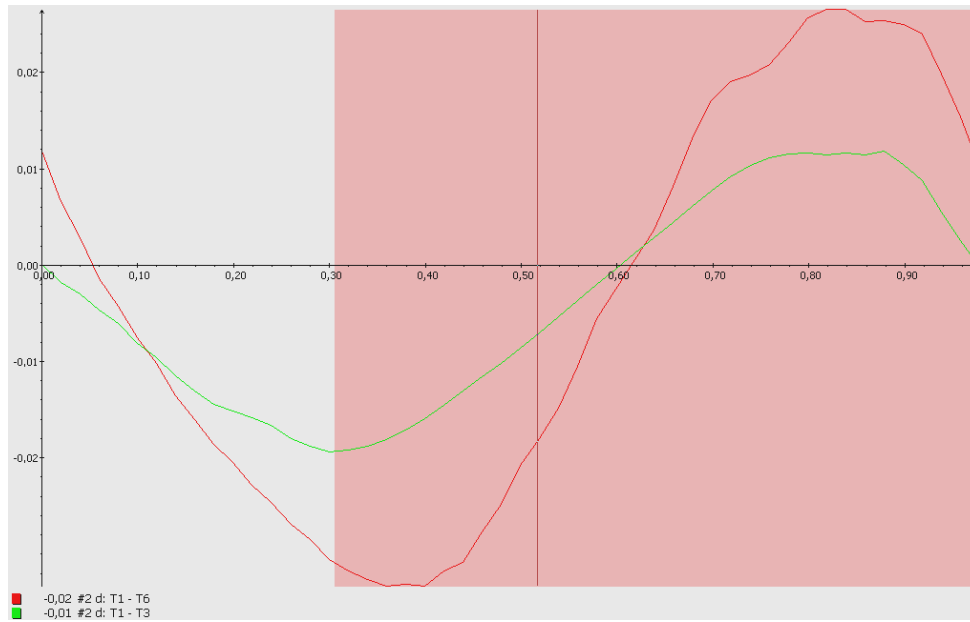


Figura 3.8 Ciclo della vertebra T3 verso T1 e T6 verso T1

3.11 Calcoli statistici

Lo studio prevedeva l'utilizzo di più animali da analizzare. Dopo aver eliminato due soggetti, in quanto presentavano delle andature evidentemente alterate dall'ambiente (treadmill ed utilizzo troppo accentuato del guinzaglio da parte del proprietario) sono stati studiati 6 cani di razza boxer e di sesso femminile.

Si è analizzato il movimento di ogni vertebra marcata in ogni soggetto fonte dello studio.

Ogni vertebra forniva un grafico formato da una serie di onde. Confrontando i grafici ottenuti con le riprese laterali, che ci permettono di vedere gli arti, si è individuato il ciclo, che corrisponde ad un passo completo, in quello formato da un'onda nella parte sinistra dell'animale con quella a lei successiva nella parte destra.

Ogni test per ogni vertebra era formato mediamente da 15 cicli. Come detto in precedenza ogni ciclo è stato tagliato in fasi. Queste possono essere sovrapposte in un unico piano cartesiano, in modo da poter calcolare la media tra tutti i cicli della vertebra che si sta analizzando (vedi figura 3.9).

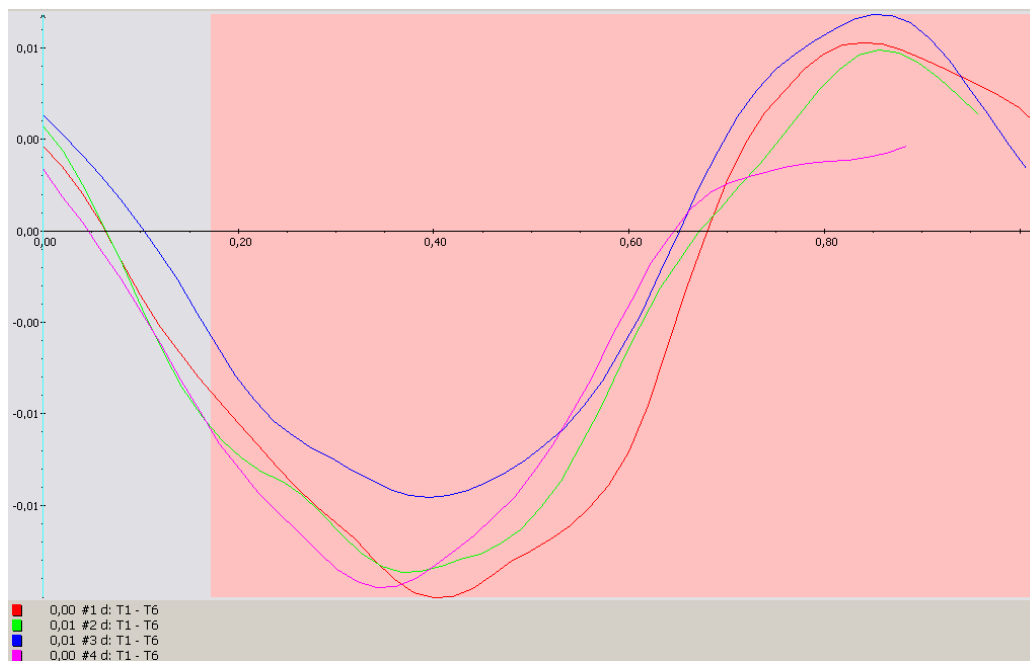


Figura 3.9 Sovrapposizione di vari cicli tagliati in fasi

Come si può notare dalla figura, ogni ciclo ha un tempo di esecuzione diverso, a causa di ciò, la sovrapposizione, anche quella numerica, diviene problematica. Il calcolo delle medie e relative deviazioni standard non sarebbe attendibile.

Il software prevede la possibilità di trasportare i dati relativi alle distanze, non più riferiti al tempo, ma alla percentuale, in modo che ogni ciclo abbia la stessa durata (vedi figura 3.10).

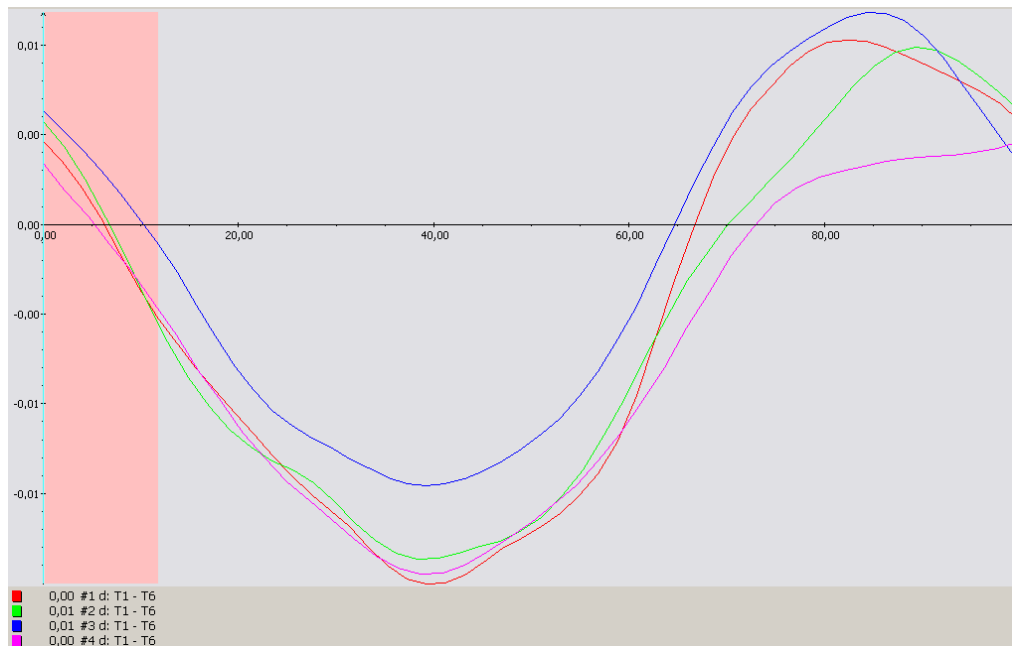


Figura 3.10 Sovrapposizione di cicli tagliati in fasi e riferiti alla percentuale

Il risultato che si ottiene è la rappresentazione grafica e numerica, fra tutti i cicli presi in considerazione e tagliati in fasi.

A questo dato possiamo aggiungere, volendo, i valori massimi e i valori minimi per ogni punto del grafico riferito alla media (vedi figura 3.11).

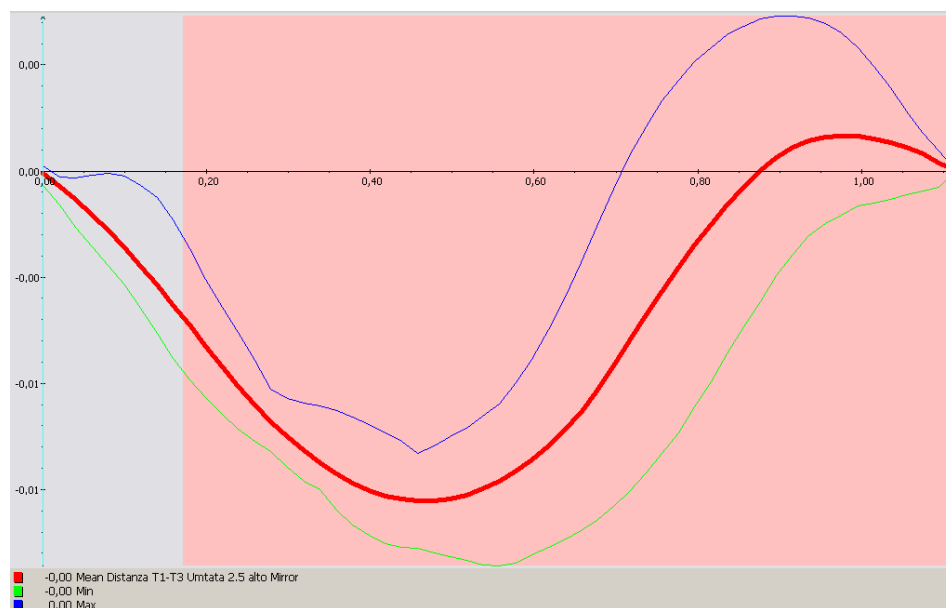


Figura 3.11 Grafico della media confrontato con valori massimi e minimi

In questo modo si può valutare le diversità tra i vari punti della media ottenuta e i dati reali ricavati dalle immagini.

Lo stesso lavoro è stato eseguito per il calcolo delle medie tra cani.

Si è presa per ogni vertebra di ogni soggetto, il valore medio calcolato dalla sequenza dei cicli, li si è traslati tutti sugli stessi assi cartesiani e si è calcolato la media tra cani. Anche in questo caso i valori sono stati trasportati in percentuale per poterli omogeneizzare.

I dati che si sono ottenuti risultano essere i valori medi, per ogni vertebra, dei 6 soggetti fonte dello studio.

Capitolo 4

Descrizione del movimento

4.1 Movimento della Vertebra T1-T3

L'allineamento della vertebra T3, riferito all'origine degli assi, situato sulla vertebra T1, costituisce il tempo iniziale per il movimento di tutte le vertebre successive. L'inizio dello spostamento parte al tempo di 0 sec. e alla distanza di 0 cm. Analizzando il movimento della vertebra T3 rispetto alla vertebra T1 e all'asse passante per questo, essa compie inizialmente uno spostamento verso la sinistra dell'animale. I dati ottenuti danno al grafico che ne consegue la forma di una parabola. Naturalmente i valori risulteranno negativi.

Il vertice di questa forma d'onda è situato alla distanza di 2 cm. Questo costituisce il punto di massimo allontanamento dal piano sagittale e viene raggiunto dopo 0.37 sec..

Raggiunto il vertice, il movimento inverte la sua direzione per tornare verso il piano sagittale. Questo viene raggiunto dopo che la vertebra ha compiuto il 75% del suo ciclo dopo 0.74 sec..

Il restante 25% lo passa nella parte destra del soggetto. Anche in questa i dati sono rappresentati da un grafico a forma d'onda, che raggiunge un valore massimo di circa 1 cm, per poi ritornare al punto zero per iniziare un nuovo ciclo (vedi grafico 4.1).

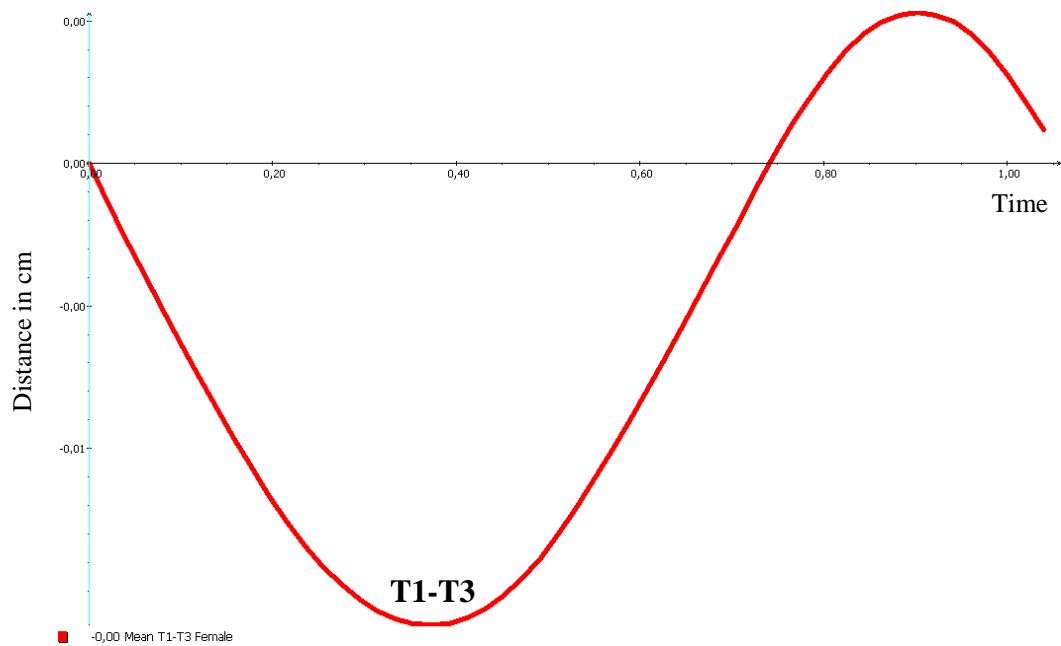


Grafico 4.1

4.2 Movimento della Vertebra T1-T6

Partendo dal momento in cui la vertebra T3 è allineata con la vertebra T1, possiamo notare come la vertebra T6 si trovi ancora spostata nella parte destra. Essa raggiunge l'allineamento con il piano sagittale leggermente in ritardo rispetto alla T3, che nel frattempo si è già spostata nella parte sinistra e ha già compiuto circa il 10% del ciclo del suo movimento totale. Essendo il movimento della T3 meno ampio e quindi più lento, si allinea con la T6 quando è stato eseguito il 15% del movimento totale del ciclo, alla distanza di 1 cm dal piano sagittale, dopo 0.15 sec., da quando la T3 ha iniziato il suo ciclo. La T6 prosegue nel suo spostamento, questo risulta essere molto più ampio, sino a raggiungere un picco di allontanamento rispetto piano sagittale di 3 cm, maggiore di 1 cm di quello della T3. Dopo il raggiungimento del picco la vertebra ritorna verso il piano sagittale ad una velocità maggiore rispetto al movimento della T3 e quindi torna ad allinearsi di nuovo con la stessa, dopo che entrambe hanno percorso il 67% del tempo impiegato per il ciclo. La T6 si allinea con il piano sagittale dopo aver passato il 70% del tempo nella parte sinistra, per poi

continuare il suo spostamento nella parte destra. Mediamente la T3 raggiunge l'allineamento con l'asse 0.03 sec. prima, rispetto alla T6. Nella parte destra compie un movimento meno ampio rispetto a quello fatto a sinistra, con un picco situato a 2 cm di distanza e di 1 cm più ampio rispetto alla T3. Per poi ripiegare e iniziare nuovamente un ciclo (vedi grafico 4.2).

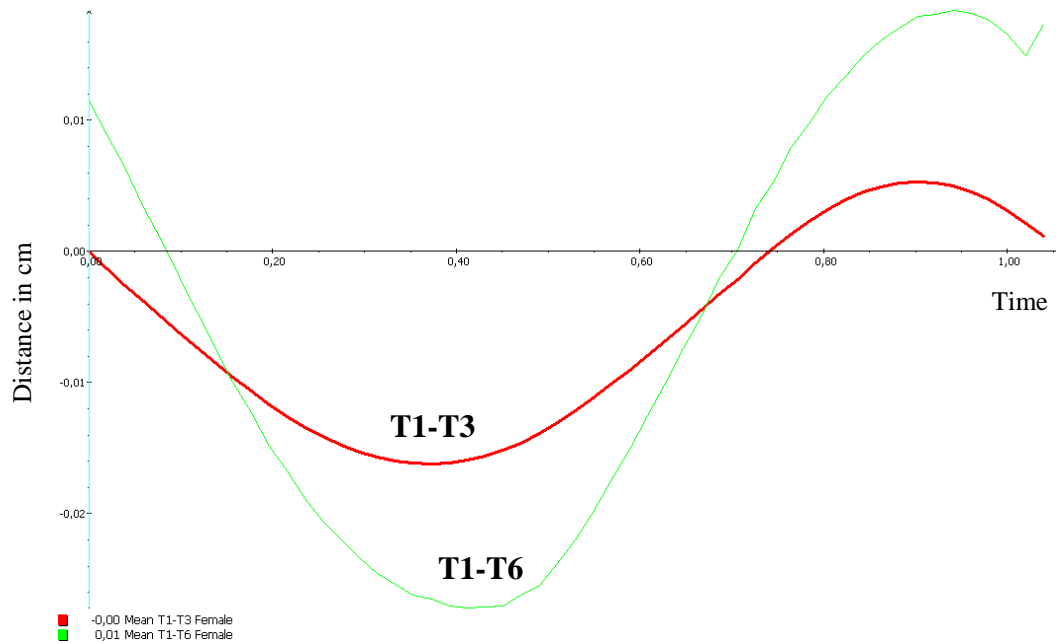


Grafico 4.2

4.3 Movimento della Vertebra T1-T9

Partendo dal momento in cui la T3 è allineata con la T1, anche qui possiamo notare come, anche la vertebra T9, sia ancora posizionata nella parte destra rispetto al piano sagittale dell'animale e presenti gli stessi valori di partenza della vertebra T6. Muovendosi più rapidamente raggiunge l'allineamento con la T1 0.7 sec. dopo la T3 ed un attimo prima che lo raggiunga la vertebra T6. Nel suo spostamento nella parte sinistra dopo 0.11 sec., si allinea con la T3 a un 1cm di distanza dal piano sagittale, a circa 1/5 del suo ciclo. Il movimento nella parte sinistra risulta essere molto ampio e raggiunge un massimo di 5 cm di distanza rispetto all'asse. Questo massimo viene

raggiunto con un ritardo di 0.05 sec. rispetto alla vertebra T6, che nel frattempo ha già iniziato il percorso di ritorno. Dopo aver raggiunto il suo punto di massimo a circa il 40% del suo ciclo, la vertebra ritorna verso il piano sagittale senza più allinearsi con le vertebre precedentemente analizzate. Il piano sagittale viene raggiunto dopo 0.79 sec., con un ritardo di 0.05 sec. rispetto alla T3 e 0.08 sec. rispetto alla T6. Nella parte destra il movimento risulta essere molto meno ampio, con un massimo di allontanamento dal piano sagittale di 2 cm, leggermente meno ampio di quello della T6 e maggiore di 1 cm rispetto a quello della T3. Nella parte destra abbiamo un nuovo allineamento con la vertebra T3, alla distanza 0.2 cm dal piano sagittale raggiunto dopo 0.81 sec., un po' dopo che la vertebra T9 è passata dal piano sagittale. L'allineamento con la T6 viene quasi raggiunto dopo 1,06 sec., poco dopo che entrambe le vertebre hanno raggiunto il massimo valore del picco inferiore (vedi grafico 4.3).

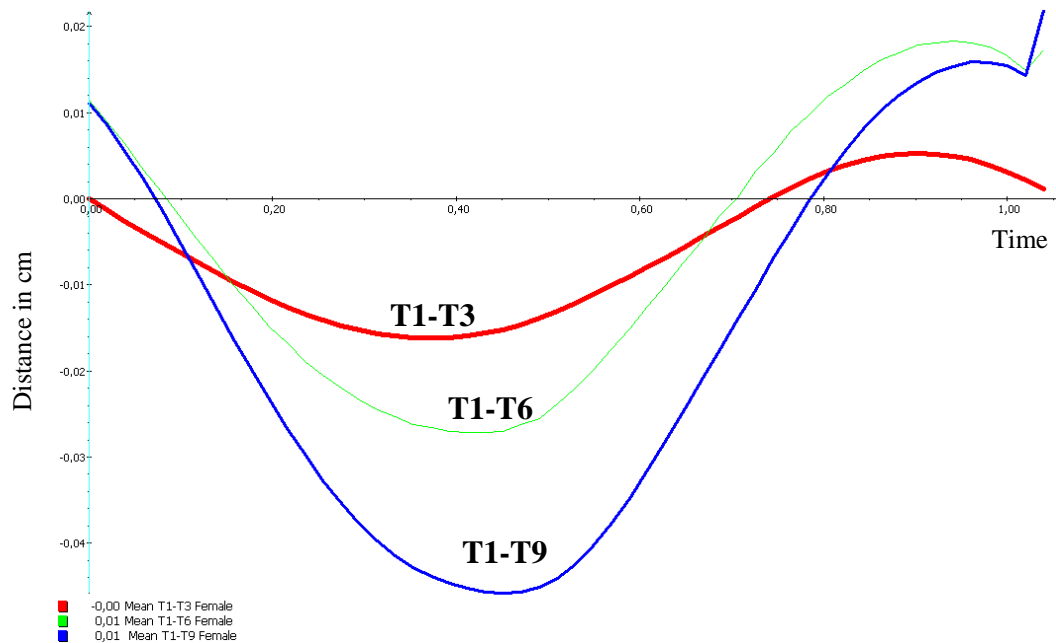


Grafico 4.3

4.4 Movimento della Vertebra T1-T11

La vertebra T11 ha un comportamento analogo a quello della T9. Se andiamo a sovrapporre i grafici degli spostamenti notiamo quasi una coincidenza degli stessi, con leggere differenze, sia nei tempi di esecuzione dei movimenti, sia nelle distanze percorse. La T11 raggiunge l'allineamento con il piano sagittale 0,02 sec. dopo la T9. Entrambe si allineano dopo 0,19 sec., poco prima di raggiungere la massima distanza sulla parte sinistra dell'animale. Per quanto riguarda le prime vertebre toraciche T3 e T6, l'allineamento nella parte sinistra avviene poco dopo lo spostamento dal piano sagittale a 0,12 sec. per la T6 e a 0,13 sec. per la T3, ad una distanza dal piano sagittale di circa 0,5 cm. Come per le altre vertebre sin qui considerate, lo spostamento risulta essere più ampio nella parte sinistra dell'animale. Questo massimo viene raggiunto con un ritardo di 0,03 sec., rispetto alla T9, con un valore leggermente superiore ha 5 cm. Dopo 0,47 sec., dopo aver percorso circa il 45% del ciclo, la vertebra inizia la fase di ritorno. L'allineamento con la T1 viene raggiunto dopo 0,80 secondi, con un ritardo di 0,01 secondi rispetto T9 dopo aver percorso circa 80% del ciclo. Da questo momento la vertebra si muove nella parte destra dell'animale, ove lo spostamento risulta essere meno ampio rispetto alla parte sinistra di circa 3 cm. Anche per la T11, nella parte destra abbiamo un allineamento con le altre vertebre che la precedono. Dopo 0,82 sec. alla distanza di 0,5 cm dal piano sagittale si allinea con T3; a 0,87 sec. alla distanza di 1 cm dal piano sagittale si allinea con la T9, mentre con la T6 si allinea dopo 0,96 sec., poco dopo aver raggiunto la massima distanza nella destra del piano sagittale. L'allineamento con T6, risulta essere ritardato di 0,11 sec. rispetto all'allineamento con la T9 ed avviene ad una distanza maggiore dal piano sagittale. Questa anomalia potrebbe essere giustificata dal fatto che la T9 nella parte destra compie un movimento meno ampio rispetto alla T6. Questo movimento risulta essere in contrasto con quello nella parte sinistra, ove la sequenza temporale degli allineamenti rispetta la sequenza delle vertebre (vedi grafico 4.4).

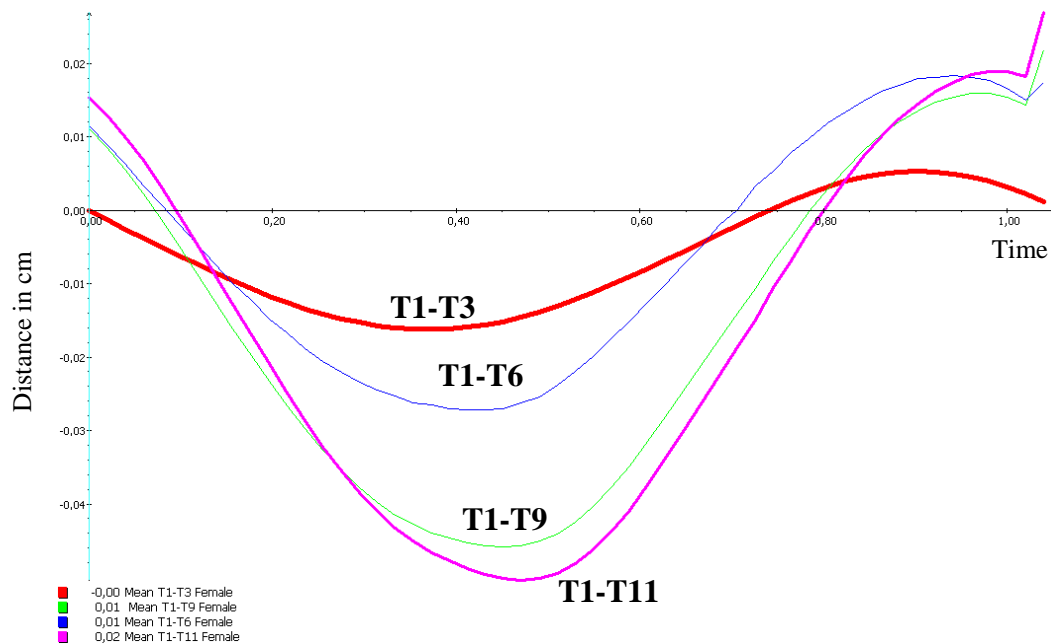


Grafico 4.4

4.5 Movimento della Vertebra T1-T13

La vertebra T13 è l'ultima delle vertebre toraciche ed è dotata di una costa fluttuante. Appare come un struttura intermedia con la sequenza delle vertebre toraciche e quelle lombari. A causa di questa sua posizione presenta alcuni movimenti leggermente anomali rispetto alle vertebre toraciche che la precedono. Pur essendo posizionata vicina alla T11 e quindi più propensa a seguirla nei suoi movimenti, si nota dai grafici come la T13 tenda ad allinearsi con il piano sagittale con un ritardo maggiore di quanto ci si aspetterebbe. Mentre tra la T9 e la T11 il tempo di allineamento risulta essere di 0.07 sec. e di 0.09 sec., con una differenza di 0.02 sec., il tempo di allineamento della T13 è di 0.13 sec., con una differenza di 0.04 sec. rispetto T11, che ricordiamo si trova vicino alla T13. Nel suo movimento nella parte sinistra lo spostamento risulta essere più ampio, come per le altre vertebre toraciche precedenti, rispetto a quello della parte destra. Durante questo suo spostamento si allinea prima con la vertebra T3, che aveva iniziato per prima il movimento nella parte sinistra, alla distanza di 1 cm dal piano sagittale, dopo 0.18 sec. dall'inizio del

ciclo. Dopo poco tempo, a 0.20 sec., abbiamo l'allineamento con la vertebra T6, a poco più di 1 cm dal piano sagittale. L'allineamento con la vertebra T9 avviene con un notevole ritardo, a 0.34 sec. dall'inizio del ciclo, con un ritardo di 0.14 sec. rispetto a quello della T6 e della T9. Naturalmente questo avviene in un punto più lontano dal piano sagittale, alla distanza di cm 4, più lontano di 3 cm dall'allineamento con la vertebra T6. Nella parte sinistra abbiamo un ultimo allineamento tra le toraciche, questa volta con la T11. Questo avviene dopo 0.45 sec. alla distanza di 5 cm, dopo aver percorso circa il 45% del suo ciclo, poco prima che la vertebra T13 raggiunga il picco di allontanamento dal piano sagittale. La massima distanza viene raggiunta dopo 0.49 sec. alla distanza di 5 cm. Raggiunto il punto più distante, la vertebra inizia la fase di riavvicinamento. Durante questo movimento non si allinea mai con nessuna delle vertebre precedentemente considerate, sino a quando non raggiunge il piano sagittale. Questo viene raggiunto dopo 0.8 sec. dall'inizio del ciclo. Possiamo notare come in questa fase di ritorno, la vertebra impieghi meno tempo rispetto alla fase di allontanamento (0,36 sec. per allontanarsi e 0.31 per avvicinarsi), con una differenza di 0,06 sec. compiendo quindi, naturalmente, un movimento più veloce rispetto al precedente. Un nuovo allineamento con le altre vertebre avviene nella parte destra dell'animale. Dopo 0,01 sec. abbiamo il primo con la vertebra T11, a 0,2 cm dal piano sagittale. Il secondo avviene in maniera anomala con la vertebra T3, dopo 0,01 sec., alla distanza di 0,4 cm. Il terzo allineamento, ritornando a rispettare la sequenza delle vertebre, avviene con la vertebra T9. Questo avviene dopo 0,03 sec. dall'allineamento precedente, alla distanza di 1 cm dal piano sagittale. L'ultimo allineamento tra le toraciche è quello con la T6. Questo accade con un maggior ritardo rispetto agli eventi precedenti, dopo 0,07 sec. rispetto all'ultimo, ad una distanza di 2 cm dal piano. Da questo punto la vertebra T13 continua nel suo processo di allontanamento dal piano sagittale, sino a raggiungere il suo picco alla distanza di 2,5 cm, questo valore risulta essere la metà rispetto a quello nella parte sinistra del corpo (vedi grafico 4.5).

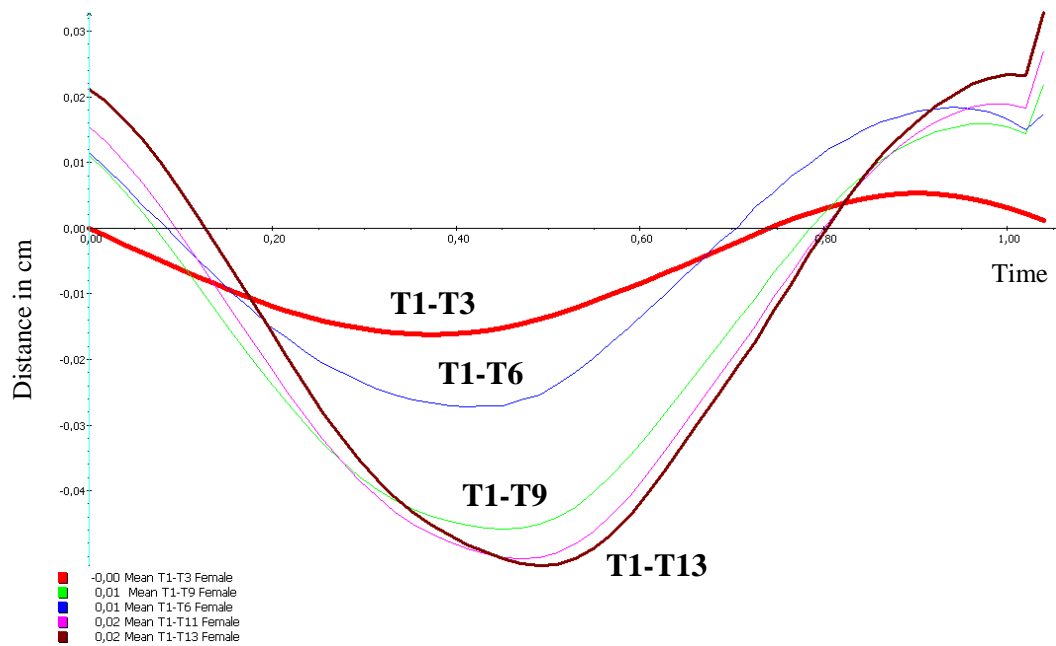


Grafico 4.5

ANALISI DEL MOVIMENTO DELLE VERTEBRE LOMBARI

Con la L1 si inizia ad analizzare il movimento delle vertebre lombari. La differenza fondamentale rispetto alle vertebre toraciche che le precedono non possiedono coste, che si attaccano allo sterno, e quindi teoricamente dovrebbero essere più libere nei loro movimenti rispetto alle toraciche a parte il condizionamento della giunzione con le vertebre che le precedono e le seguono.

4.6 Movimento della Vertebra T1-L1

La vertebra L1 è la prima della serie delle vertebre lombari, la prima completamente fluttuante. Costituisce con la T13 il segmento di separazione della sequenza lombotoracica. Avendo sempre come punto di inizio del ciclo, il momento in cui la vertebra T3 si allinea con la T1, lungo il piano sagittale, il movimento inizia nella parte destra dell'animale e raggiunge l'allineamento 0.16 sec. dopo che è stato raggiunto dalla vertebra T3; con un ritardo di 0.03 sec. rispetto alla T13 che è la vertebra a lei più vicina. Come tutte le vertebre sin qui considerate compie un movimento più ampio nella parte sinistra. Dopo 0.09 sec., da quando ha cominciato a spostarsi nella parte sinistra, si allinea stranamente per prima con la vertebra T3. Non seguendo l'ordine che avveniva per l'allineamento fra le toraciche, che era ordinati e progressivo. Questo avviene alla distanza di 1 cm dal piano sagittale. Dopo 0.19 sec., sempre dopo l'allineamento con il piano sagittale, abbiamo l'allineamento con la vertebra T6 alla distanza di 3 cm. La vertebra L1, quando si trova nella parte sinistra, raggiunge la sua massima distanza dal piano alla distanza di 3 cm dallo stesso, dopo 0,35 sec.. Durante questa parte del movimento, possiamo notare come, stranamente, la L1 non si allinei, durante il suo spostamento, con nessuna delle rimanenti vertebre toraciche, tranne con T3 e T6. I picchi di massima distanza vengono raggiunti dalla T11, T13 e L1 quasi contemporaneamente dopo 0.51 sec. dall'inizio del ciclo e inoltre si nota come il picco della vertebra L1, che raggiunge la distanza di 3 cm, sia di molto inferiore rispetto a quello delle vertebre T11 e T13 che è di 5 cm . Dopo il raggiungimento della massima distanza, la vertebra L1 inizia il processo di riavvicinamento al piano sagittale. Dopo 0.71 sec., a circa $\frac{3}{4}$ del percorso di riavvicinamento al piano sagittale, la vertebra L1 si allinea con la vertebra T9 alla distanza di 1.5 cm. Questo viene raggiunto dopo 0.09 sec., dal momento in cui raggiunge la massima distanza (a 0.80 sec. dall'inizio del ciclo). Al momento del raggiungimento dell'allineamento con il piano sagittale si può notare come si abbia contemporaneamente anche l'allineamento sia con la vertebra T11 sia con la vertebra T13. Mentre tutte le altre vertebre sin qui considerate, hanno allineamenti a copie, le tre vertebre centrali risultano essere perfettamente allineate lungo il piano sagittale nello stesso momento. Come per le vertebre precedenti, anche la L1, nella parte

sinistra, impiega un tempo maggiore per raggiungere il punto di massimo allontanamento, rispetto al tempo impiegato per ritornare dal punto di massima distanza al piano sagittale (0.35 sec. piano sagittale/picco, rispetto 0,29 sec. picco/piano sagittale). Anche in questo caso, i tempi diversi denotano due diverse velocità nel compiere i due movimenti. Il movimento della parte destra dei soggetti, anche per la vertebra L1, risulta essere meno ampio rispetto a quello compiuto a sinistra. I valori ottenuti in questo caso, non sono così diversi come per le vertebre toraciche, infatti si notano valori di 2 cm per il picco di destra e di 3 cm per il picco di sinistra, presentando un solo cm 1 di differenza. Dopo 0.82 sec. e alla distanza di 0.5 cm dal piano sagittale la vertebra L1 si allinea con la vertebra T3. Dopo 0.92 sec. e alla distanza di 2 cm abbiamo l'allineamento con la vertebra T9, che nel frattempo ha raggiunto il suo picco nella parte destra. Poco tempo dopo, a 0.98 sec., la L1 si allinea questa volta con vertebra T6, che nel frattempo ha iniziato la fase di riavvicinamento, nella parte destra, al piano sagittale, sempre alla distanza di circa 2 cm dallo stesso. Il successivo allineamento avviene con la vertebra T11, sempre a circa 2 cm dal piano sagittale, dopo 1.00 sec. dall'inizio del ciclo. L'ultimo allineamento, quello con la vertebra T13 avviene a circa 2 cm, ma 0.03 sec dopo che è già iniziato un nuovo ciclo, con l'allineamento della T3 con la T1 e dopo che entrambe, hanno già iniziato la fase di avvicinamento al piano sagittale (vedi grafico 4.6).

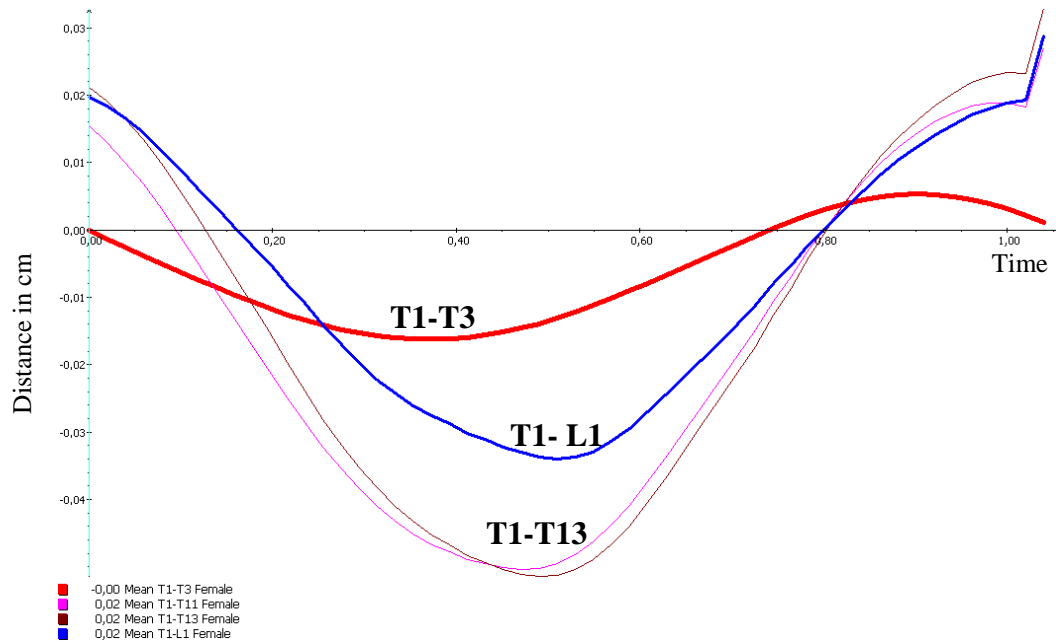


Grafico 4.6

L'analisi del movimento delle successive vertebre lombari non terrà conto delle interazioni con le vertebre toraciche perché la descrizione risulterebbe troppo complessa, anche se come è ovvio il movimento di ogni vertebra è la diretta conseguenza del movimento di ognuna delle altre vertebre. Nella descrizione da questo punto in avanti si analizzeranno solo le interazioni delle vertebre lombari tra di loro con eventuali riferimenti alle toraciche qualora si manifestino fenomeni rilevanti o di particolare interesse.

4.7 Movimento della Vertebra T1-L3

Anche il movimento della terza vertebra lombare si svolge intorno al piano sagittale. Esso, partendo dal lato destro degli animali, raggiunge la linea di simmetria dopo 0.10 sec., dall'inizio del ciclo; 0.06 sec. prima che lo raggiunga la vertebra L1. Quando la L3 raggiunge il piano sagittale, la vertebra L1 si trova ancora ad 1 cm di distanza dallo stesso, sul lato destro degli animali. Il movimento nella parte sinistra prosegue in modo parallelo a quello della vertebra L1, in modo molto più ampio. La vertebra L3 raggiunge il suo picco di massimo dopo 0.53 sec., 0.02 sec. dopo che lo ha raggiunto la vertebra L1. Come già detto il movimento della vertebra L3 risulta essere molto più ampio, con un picco di massimo di 6 cm rispetto a quello della L1, che risulta essere di 3 cm. Confrontando i tempi di allontanamento ed avvicinamento della vertebra L3 al piano sagittale, si può notare come questi, a differenza di quelli delle vertebre che la precedono, risultano essere uguali (0.52 sec. piano sagittale/picco e picco/piano sagittale) e di conseguenza si può dire che si muovono con velocità uguali, conferendo certamente un movimento più armonico. Dopo 0.92 sec. la vertebra L3 torna ad allinearsi con il piano sagittale, questo avviene 0.12 sec. dopo che è stato raggiunto dalla vertebra L1. Il percorso della vertebra L3, anche nella parte destra degli animali, risulta parallelo a quello della L1, senza nessun allineamento tra le due vertebre. Il picco di allontanamento nella parte destra risulta essere inferiore a quello della L1 di 1 cm (2 cm L1- 1 cm L3). Questo, probabilmente, dovuto alla necessità di compensare la maggiore escursione della L3 rispetto alla L1 nella parte sinistra degli animali (vedi grafico 4.7).

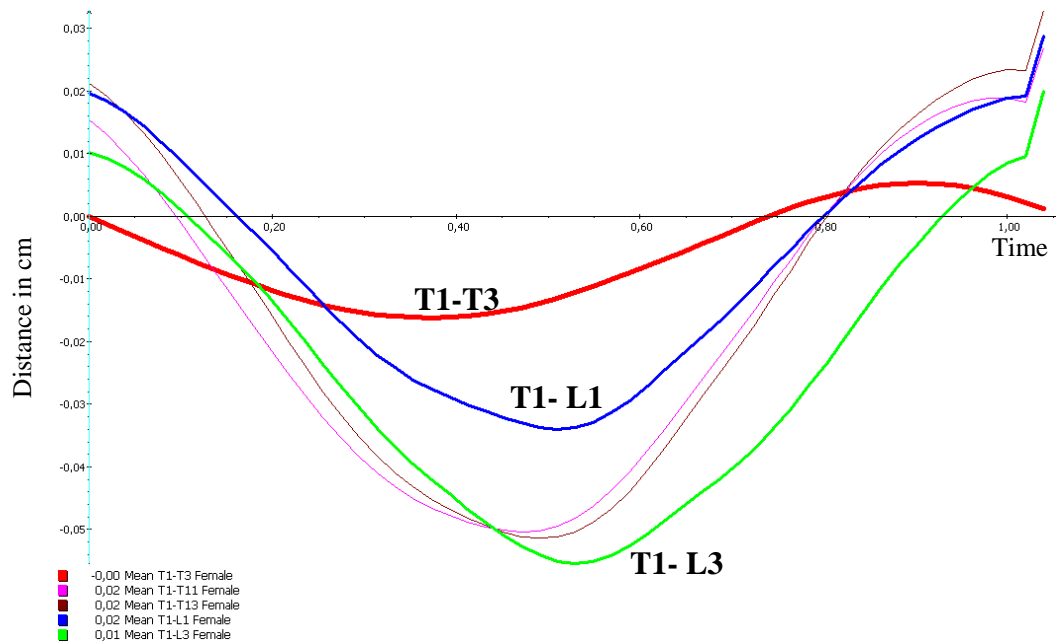


Grafico 4.7

4.8 Movimento della Vertebra T1-L5

Il movimento della vertebra L5 è costituito da una fase di allontanamento e di un fase di avvicinamento al piano sagittale come per tutte le vertebre, però questo si svolge interamente nella parte sinistra degli animali. Mentre per tutte le altre vertebre i grafico che rappresentava il movimento intorno al piano sagittale avevano la forma di una S, il grafico che rappresenta il movimento della L5 a la forma di una U. A 0.01 sec., quasi contemporaneamente con la vertebra T3 la vertebra L5 inizia il suo spostamento nella parte sinistra degli animali. In questo momento abbiamo le tre vertebre T1-T3-L5 allineate sul piano sagittale, mentre tutte le vertebre sin qui analizzate si trovano in punti diversi del piano perpendicolare al piano sagittale. Mentre la L5 si sposta dal piano sagittale, il suo movimento risulta essere quasi uguale al movimento della vertebra T3 tanto da procedere quasi allineate sino alla distanza di 1 cm dal piano sagittale e solo a 0.19 sec. dall'inizio del ciclo i loro movimenti tendono a differenziarsi. In questo momento abbiamo un allineamento anche con la L3. La T3 avendo un movimento di allontanamento molto meno ampio

resta più vicino al piano sagittale mentre la vertebra L5 prosegue nel suo processo di allontanamento dal piano sagittale sino a raggiungere il suo picco di distanza dopo 0.55 sec. e arrivando a 5 cm dal piano sagittale (durante questa fase di allontanamento la L5 si allinea in tempi e a distanze diverse anche con le vertebre toraciche). In un confronto con le precedenti vertebre lombari, notiamo che la distanza raggiunta dal picco della L5 è maggiore rispetto a quello della L1 di 2 cm (3 cm picco L1 e 5 cm picco L5) (come ci si potrebbe aspettare) ma inferiore di 1 cm rispetto a quello della L3 (6 cm L3 e 5 cm L5) . Dopo 0.66 sec. dall'inizio del ciclo e 0.11 sec. dopo aver raggiunto il picco, nella fase di riavvicinamento al piano sagittale, la vertebra L5 si allinea nuovamente con la L3. Durante tutto il suo percorso la L5 non si allinea mai con la vertebra L1. Dopo 1,05 sec., tempo di un ciclo completo, la L5 raggiunge, insieme alla T3 che proveniva dalla parte opposta “destra”, il piano sagittale per iniziare un nuovo ciclo. I tempi di esecuzione delle due fasi di allontanamento ed avvicinamento al piano sagittale, risultano essere uguali, quindi presumibilmente tutto il movimento viene fatto ad una velocità costante (vedi grafico 4.8).

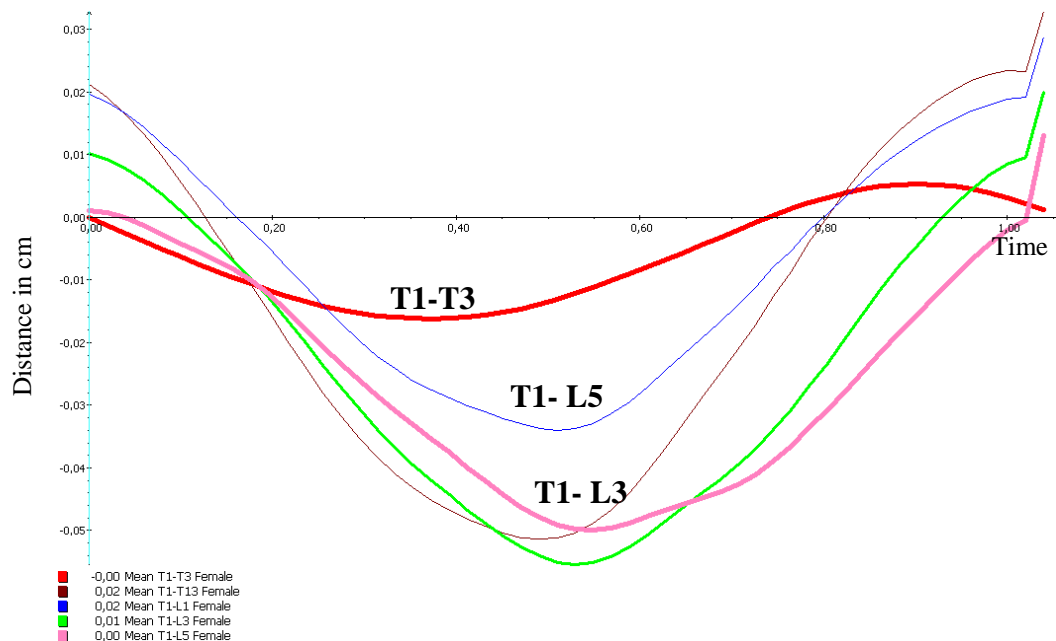


Grafico 4.8

4.9 Movimento della Vertebra T1-L6

Analizzando tutti i valori relativi allo spostamento della vertebra T6, innanzi tutto, notiamo come questo sia completamente spostato nella parte sinistra dell'animale, senza mai raggiungere il piano sagittale. Questo conferisce al movimento complessivo della colonna spinale una struttura asimmetrica, ove il treno posteriore è spostato lateralmente rispetto al treno anteriore. Di conseguenza ciò ci permette di dire che gli arti non si muovono come se si trovassero su due binari.

Il ciclo della vertebra T6 inizia alla distanza di 1,5 cm dal piano sagittale e, come possiamo notare dal grafico, per circa 0,18 secondi non varia la sua direzione, restando sempre parallelo e alla medesima distanza dal piano sagittale. Da questo momento in avanti inizia una fase di allontanamento. Alla distanza di 1,8 cm dopo 0,23 sec., si allinea con le vertebre T3 e T5 che lo precedono. Il processo di allontanamento prosegue in modo costante sino a circa il 50% del ciclo. A questo punto alla distanza di 4cm, dopo 0.55 sec., in coincidenza con il raggiungimento della massima distanza delle vertebre T3 e T5, che risulta essere rispettivamente di 0,5 cm e 0,6 cm, il processo rallenta. Alla distanza di 4,5 cm dal piano, la vertebra L6 si allinea con le vertebre L3 e L5, proseguendo poi nel percorso di allontanamento. Il picco viene raggiunto dopo 0,72 sec. alla distanza di 4,8 cm. Raggiunta la massima distanza, il movimento si inverte dopo aver percorso circa il 75% del ciclo. Durante la fase di riavvicinamento, che avviene in modo costante, la vertebra non si allinea con nessun'altra vertebra lombare, proseguendo sino alla distanza di 1,5 cm, per poi iniziare un nuovo ciclo. Analizzando il movimento nella sua interezza, notiamo che la fase di rallentamento nell'allontanamento dal piano sagittale, sia tipico solamente di questa vertebra. La forma d'onda assomiglia abbastanza ad una W, come rilevato anche nello studio di [8] (vedi grafico 4.9).

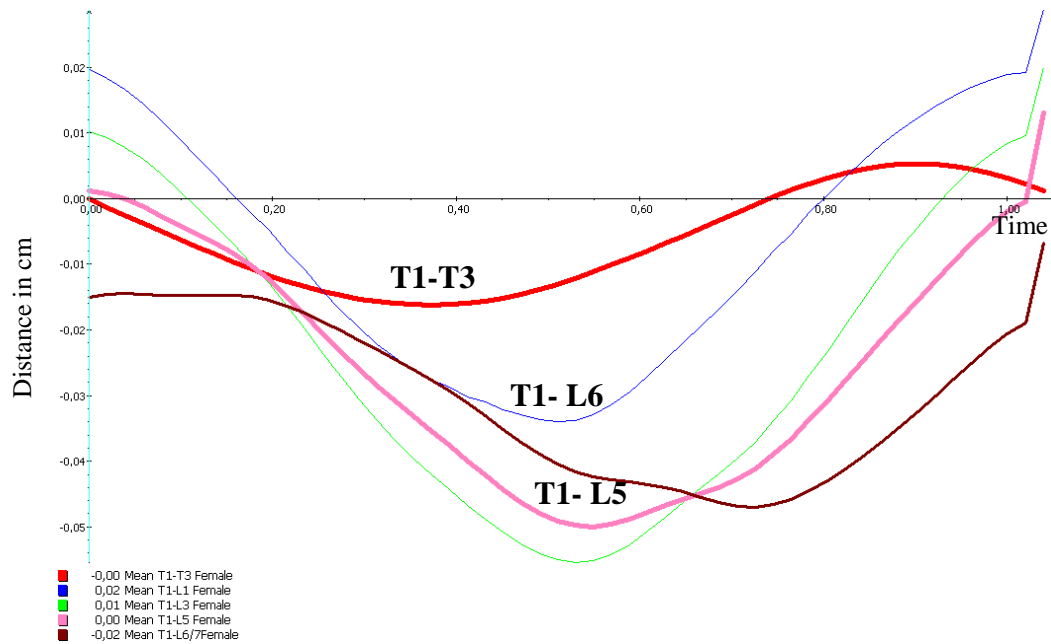


Grafico 4.9

4.10 Movimento della Vertebra T1-S

Le vertebre sacrali, dal punto di vista anatomico, presentano una caratteristica peculiare: numericamente sono tre ma sono saldate tra di loro, tanto da poter essere considerate come una vertebra sola, più lunga di qualsiasi altra. I markers sono stati collocati nel punto più vicino all'ultima lombare che dovrebbe coincidere con la prima vertebra sacrale. Nonostante sia collegata alla L6, essa ha rilevato un movimento anomalo rispetto a quello di tutte le vertebre sin qui considerate. Mentre tutti i cicli sin qui considerati, iniziavano con la minima distanza dal piano sagittale, la vertebra sacrale ha come punto di partenza una distanza abbastanza grande di 3,5 cm. Questa tende a diminuire in maniera costante e quindi avvicinarsi al piano. Il momento di massimo avvicinamento lo abbiamo dopo 0,33 sec. alla distanza di 2.2 cm. Se andiamo a confrontare questo valore con quello della terza vertebra toracica (T3), possiamo notare come il momento di massimo avvicinamento della vertebra sacrale, coincida con quello di massimo allontanamento della vertebra T3. Si può

notare come le due parti degli animali, quella anteriore e quella posteriore, in questo momento tendano ad avvicinarsi fino quasi ad allinearsi.

Questo movimento così diverso porta ad allineamento con le altre vertebre sacrali abbastanza anticipato ed in alcune situazioni abbastanza anomalo. Il primo allineamento lo abbiamo con la vertebra L3 dopo 0,24 sec. alla distanza di 2,6 cm, il secondo dopo 0,27 sec. alla distanza di 2,4 cm con la vertebra L5, il terzo allineamento avviene dopo 0,33 sec. alla distanza di 2,3 cm, poco prima che la sacrale raggiunga il picco di avvicinamento, ma coinvolge le due vertebre poste agli estremi della porzione lombare della colonna spinale: le vertebra L1 e L6. Raggiunto il picco di avvicinamento la vertebra sacrale inizia la fase di allontanamento dal piano sagittale. Questo movimento non appare lineare come per le altre vertebre ma dopo 0,55 sec. e alla distanza di 4 cm presenta un leggero flesso dovuto ad un leggero rallentamento. Appena prima che inizi questo piccolo flesso, abbiamo un secondo allineamento con la vertebra L1, mentre alla fine dello stesso lo abbiamo con tutte e tre le vertebre lombari rimanenti: L3, L5 e L6. Questo avviene dopo 0,66 sec. dall'inizio del ciclo e alla distanza di 4,4 cm. Da questo punto in avanti la fase di allontanamento risulta più rapida, sino a raggiungere il picco di allontanamento dopo 0,81 sec. alla distanza di 6,2 cm. Se torniamo a confrontare l'andamento grafico della vertebra S con quello della T3, notiamo che entrambe in questa fase raggiungono la massima distanza tra di loro: la T3 ha quasi raggiunto il picco nella parte destra e la S il picco nella parte sinistra. Raggiunta la massima distanza la vertebra sacrale inizia la fase di avvicinamento al piano sagittale, per poi iniziare un nuovo ciclo.

Se confrontiamo fra di loro i grafici della vertebra T3 e quello della S, notiamo come questi risultino quasi speculari. Analizzando i momenti ed i punti di allineamento delle sacrali con le altre vertebre lombari, che sono fluttuanti, notiamo come non seguano un andamento né ordinato né cronologico (vedi grafico 4.10).

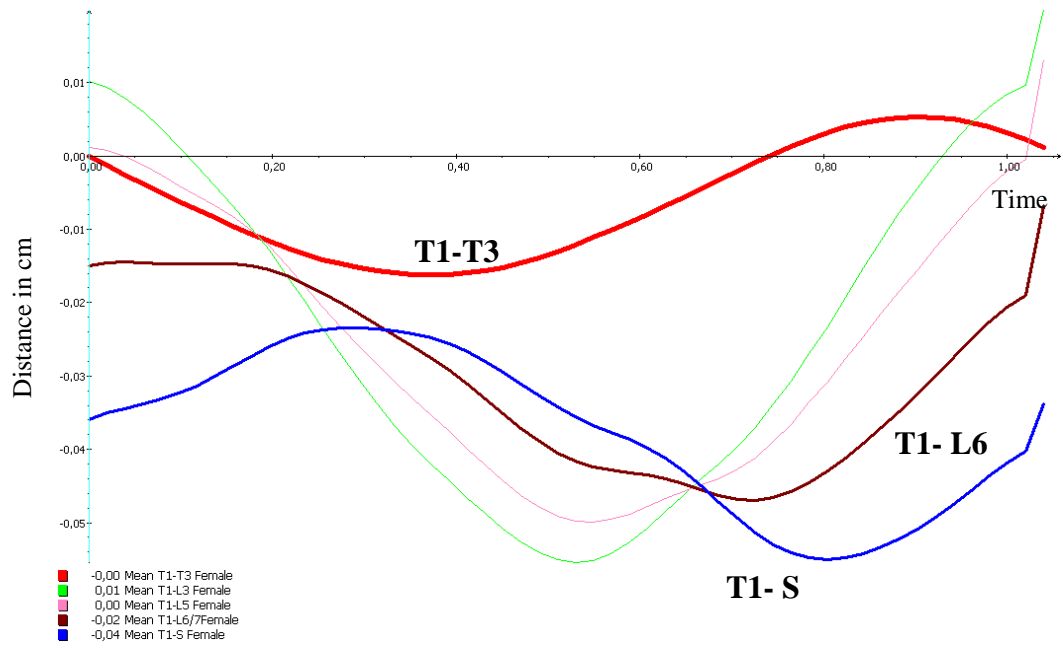


Grafico 4.10

ANALISI DEI TEMPI E DEI MOMENTI PIÙ SIGNIFICATIVI

4.11 Match points riferiti al tempo

Il movimento della colonna spinale, precedentemente descritto, non risulta di facile lettura, pur essendo indispensabile per la comprensione degli spostamenti e delle interazione che le vertebre hanno tra di loro.

Utilizzando un numero limitato e significativo di punti, all'interno dell'intero ciclo dello spostamento di ogni singola vertebra, e li si confronta con quelli di tutte le altre vertebre, è possibile ottenere informazioni di più facile gestione. Nella tabella 4.1 si sono presi in considerazione i tempi in cui ogni singola vertebra incontra il piano sagittale e il tempo di raggiungimento della massima distanza sul lato sinistro dell'animale, che è quello che presenta l'allontanamento maggiore rispetto al piano. Naturalmente i dati sono riferiti ai valori medi, ottenuti dai sei soggetti analizzati.

Tabella 4.1 Tempi di incontro con il piano sagittale

		1° incontro	Tempo picco Sx	2° incontro
Seconds	T1-T3	0	0,37	0,74
	T1-T6	0,09	0,42	0,71
	T1-T9	0,07	0,45	0,79
	T1-T11	0,10	0,47	0,8
	T1-T13	0,13	0,49	0,8
	T1-L1	0,16	0,51	0,8
	T1-L3	0,1	0,53	0,93
	T1-L5	0,03	0,55	1,02
	T1-L6	N.R.	0,72	N.R.
	T1-S	N.R.	0,81	N.R.

Tempo medio di esecuzione di un passo o ciclo 1,07

Nella prima colonna sono stati collocati i tempi di allineamento con il piano sagittale. Il momento di inizio, per tutti i cicli delle vertebre, coincide con l'allineamento della vertebra T3 con la vertebra T1.

Questo naturalmente sarà il momento 0. Le altre vertebre si troveranno ancora nella parte destra e durante il loro movimento incontreranno il piano sagittale in tempi successivi. La vertebra T6, naturalmente, raggiunge il piano in un momento successivo, che quantificheremo in 0.09 secondi. La vertebra T9, che si trova ad una distanza maggiore, ci si aspetterebbe che arrivi ad allinearsi con un ritardo maggiore. Il valore di 0.07 secondi, indica invece che questa vertebra raggiunge il piano sagittale prima che lo raggiunga la vertebra che lo precede.

Questo dato anomalo, non è un artefatto dovuto al calcolo delle medie ma si riscontra, seppure con valori leggermente diversi, in tutti i soggetti analizzati. Proseguendo con la sequenza delle vertebre incontriamo la T11.

Questa presenta un valore di 0.10 secondi al momento dell'incontro con il piano sagittale.

Il tempo qui rilevato, risulta maggiore rispetto a quello delle due vertebre che lo precedono, come ci si aspetterebbe in un andamento ondulatorio. Non molto diverso da quello della T6 ma dobbiamo tenere conto, che il tempo della T9 è stato anticipato e, in ogni caso, la T11 è connessa con le vertebre che la precedono.

I tempi di allineamento della T13 e della L1 sono riconducibili ad un andamento ondulatorio della spina dorsale. Essi si intersecano con il piano sagittale, con tempi progressivamente crescenti: a 0.13 e a 0.16 secondi.

La terza vertebra sacrale, che anatomicamente risulta completamente fluttuante e sufficientemente lontana dalle toraciche, presenta un andamento anomalo. Il tempo di primo incontro con il piano sagittale avviene dopo 1.0 secondi.

Questo presenta un valore molto simile a quello della vertebra T6 che risulta di 0.9 secondi, come se l'animale tendesse ad allineare la parte posteriore con la parte anteriore, nel tentativo di far assumere alla colonna spinale una forma ad arco.

La vertebra T5 conferma, per quanto riguarda il tempo di allineamento, l'andamento riscontrato per la T3, accentuando maggiormente la sua caratteristica.

Il tempo di incontro con il piano avviene dopo 0.03 secondi, molto vicino a quello della terza vertebra toracica T3, completando la forma ad arco nel momento in cui le vertebre incontrano il piano sagittale.

Le successive vertebre T6 e S (sesta lombare e sacrale) non intersecano mai il piano sagittale, restando costantemente durante il loro spostamento nella parte sinistra dell'animale.

Nella seconda colonna della tabella sono stati inseriti i tempi in cui le varie vertebre raggiungono il punto più distante dal piano sagittale nella parte sinistra dell'animale. Possiamo notare, come questi, partendo dalla vertebra T3, raggiungano la massima distanza in modo progressivo e con una cadenza abbastanza regolare di circa 0.02 secondi.

A questo andamento fanno eccezione le ultime due vertebre situate nella parte posteriore - la sesta lombare L6 e la sacrale S -. Queste hanno un andamento cronologico conforme a quelle che le precedono, ma variano i tempi. La L6 raggiunge la massima distanza dopo 0.72 secondi, con 0.20 secondi di ritardo rispetto alla vertebra che la precede (dieci volte più in ritardo rispetto alla media di tutte le altre vertebre che era di 0.02 secondi).

L'ultima vertebra, la sacrale, presenta lo stesso andamento cronologico, ma raggiunge il suo picco dopo 0.81 secondo, con un ritardo di 0.10 secondi rispetto alla T6.

Raggiunta la massima distanza, le vertebre iniziano la fase di ritorno verso il piano sagittale.

Nella terza colonna sono stati inseriti i tempi con cui le vertebre incontrano, durante il ciclo, per la seconda volta il piano.

Anche in questo caso nelle prime vertebre toraciche riscontriamo un'anomalia.

La prima vertebra che incontra il piano non è la T3, come ci si potrebbe aspettare, ma la T6.

Questa lo raggiunge dopo 0.71 secondi, dall'inizio del ciclo, con 0,03 secondi di anticipo rispetto alla T3 che impiega 0.74 secondi. Questo ritardo della terza vertebra toracica dovrebbe conferire alla colonna vertebrale, in quel momento, una forma di V rovesciato.

La T9 si comporta regolarmente, raggiungendo il piano in un tempo successivo, dopo 0.79 secondi.

Le successive tre vertebre considerate presentano un nuovo andamento anomalo. Le tre vertebre centrali. T11, T13 ed L1 si comportano come fossero un corpo rigido, raggiungendo contemporaneamente, al tempo di 0.80 secondi il piano sagittale. In questo momento abbiamo tutte e tre le vertebre perfettamente allineate fra di loro nella parte centrale dell'animale.

Le vertebre lombari L3 ed L5 incontrano il piano sagittale, come atteso in momenti successivi ai tempi rispettivamente di 0.93 secondi e di 1.02 secondi, con un intervallo di 0.1 secondi.

Le ultime due vertebre non incontrano mai il piano sagittale.

4.12 Distanze massime raggiunte

I valori massimi, espressi in centimetri, che le vertebre raggiungono durante il loro allontanamento dal piano sagittale, costituiscono sicuramente un dato significativo, ma sono soprattutto valori di facile identificazione ed in grado di fornire indicazioni interessanti sul movimento della colonna vertebrale.

Qualora si riuscisse a trovare un range di valori, che individuasse la normalità, i picchi di allontanamento potrebbero essere degli ottimi indicatori di diversi tipi di patologie.

La tabella 4.2 contiene due colonne, ove sono raccolti, nella prima i valori del massimo allontanamento nella parte sinistra dell'animale ed nella seconda i valori nella parte destra.

Dato che i dati rappresentati sono i valori ottenuti dalla media, tra i sei cani analizzati, si sono aggiunti anche i valori di massimo e di minimo del campione (approssimati).

Tabella 4.2 Valori espressi in cm dei picchi di massima

	Valori massimi a sinistra	Valori massimi a destra
T1-T3	2 ± 0.5 cm	1 ± 0.4 cm
T1-T6	3 ± 1.0 cm	2 ± 1.0 cm
T1-T9	5 ± 0.5 cm	2 ± 1.0 cm
T1-T11	5 ± 1.0 cm	2 ± 1.5 cm
T1-T13	5 ± 1.0 cm	2 ± 1.8 cm
T1-L1	3 ± 3.0 cm	2 ± 4.0 cm
T1-L3	6 ± 1.5 cm	1 ± 2.0 cm
T1-L5	5 ± 1.5 cm	0 ± 2.0 cm
T1-L6	5 ± 2.0 cm	1 ± 2.0 cm*
T1-S	5 ± 3.0 cm	2 ± 2.0 cm*

**Non raggiunge il lato destro*

Nella prima colonna sono raccolti i valori, espressi in cm, dei punti di massimo allontanamento delle vertebre analizzate nella parte sinistra dell'animale, dal piano sagittale. In questo lato, come hanno anche evidenziato i grafici, valori dell'escursione, normalmente, sono più ampi rispetto alla parte destra.

La vertebra T3, la più vicina al punto di riferimento T1, raggiunge la sua massima distanza a 2 centimetri dal piano sagittale.

La T6, che si trova ad una distanza maggiore dalla vertebra di riferimento, raggiunge il picco di allontanamento a 3 centimetri. Una maggior distanza dal piano, appare congrua con quanto ci si aspetterebbe, ma il valore di 3 cm non sembra sufficientemente ampio per giustificare la distanza di sei vertebre dal punto di riferimento.

Le successive tre vertebre toraciche: T9, T11 e T13, presentano tutte e tre il medesimo valore di 5 cm.

Anche in questo caso ci si aspetterebbe che la T11 e la T13, essendo poste in punti diversi e sempre più lontani, debbano avere valori maggiori. Si potrebbe ipotizzare che, un lavoro dei muscoli della colonna vertebrale e la gabbia toracica, li tenga sottocontrollo, impedendo loro di superare determinati valori indispensabili per l'equilibrio ed una corretta andatura.

La prima vertebra lombare L1, la prima veramente fluttuante, presenta un dato, relativo al picco di massima, decisamente in contro tendenza, rispetto a quello delle vertebre che la precedono. Il valore che ci si aspetterebbe dovrebbe essere leggermente maggiore dei precedenti, mentre risulta essere decisamente inferiore, avendo una distanza dal piano sagittale di soli 3 centimetri. Essendo unito alla vertebra T13, che presenta un valore di 5 cm, stupisce il fatto che si allontani dal piano sagittale 2 centimetri in meno come se fosse rallentata da forze esterne, diverse da quelle inerziali del movimento della colonna spinale. Questa anomalia, seppure con valori diversi è stata riscontrata in tutti i soggetti.

La differenza, tra valore massimo e valore minimo, di ± 3.0 cm, indica che i soggetti studiati gestiscono questa differenza in modo più o meno ampio.

La vertebra L3 ha una distanza del piano sagittale di 6 centimetri. Questo valore presenta una continuità se confrontato con la T13, che presentava il picco di 5 cm, ma una discontinuità se confrontato con la L1. Se analizziamo i dati relativi alla sequenza di queste tre vertebre, T13, L1 e L3, possiamo notare che nel punto di massima distanza formano una sorta di V rovesciata, abbastanza difficile da spiegare, ma di sicuro interesse per poter rilevare anomalie nel movimento della colonna spinale.

Le ultime tre vertebre analizzate L5, L6 ed S, presentano tutte lo stesso valore di 5 cm, per quanto riguarda il picco di allontanamento nella parte sinistra.

Questa uniformità dei dati potrebbe essere giustificata dal fatto che, le tre vertebre sono vincolate tra di loro, una di seguito all'altra ma soprattutto perché le vertebre sacrali sono unite alle anche, che costituiscono i primi segmenti ossei degli arti e strutturalmente sono larghe e piatte. Quindi gli animali nella deambulazione non possono uscire da questi vincoli anatomici.

Nella seconda colonna della tabella 4.2 sono raggruppati i dati relativi ai picchi di allontanamento alla destra degli animali. Questi presentano valori decisamente inferiori a quelli nella parte sinistra e molto più uniformi.

Lo spostamento della vertebra T3 è di un solo centimetro, la metà di quello alla sinistra. Tutte le altre vertebre dalla T6 all'L1 presentano, per il picco un valore di 2 centimetri. L'unica differenza che possiamo riscontrare in questo gruppo di vertebre, riguarda la L1. Questa evidenza, come a sinistra, una grande differenza tra massimi e minimi rilevati all'interno del campione studiato.

A partire dalla L3, i valori dei picchi iniziano a diminuire di 1 centimetro per ogni vertebra rilevata, sino a giungere alla vertebra L5, dove il picco coincide con il piano sagittale e il dato ottenuto è di 0 centimetri.

La L6 e la S non raggiungono mai il piano sagittale, rimanendo sempre nella parte sinistra.

In ogni caso presentano un valore minimo, che è il momento in cui si avvicinano maggiormente al piano, che è di 1 centimetro per la L6 e di 2 centimetri per la S.

Capitolo 5

Studio e modellazione della colonna vertebrale

Molti ricercatori si sono adoperati per la realizzazione di modelli accurati della spina dorsale umana.

Nel recente studio di Monheit e Badler (11) è stato sviluppato un accurato modello di colonna spinale tenendo conto delle informazioni anatomiche, del range di movimento delle vertebre e dei conseguenti effetti muscolari.

In (7,6) viene rappresentato un metodo per stimare la postura della colonna vertebrale umana basata sulla visione computerizzata, nel quale la struttura è approssimata da un insieme di vertebre sferiche connesse tra di loro (vedi figura 5.1).

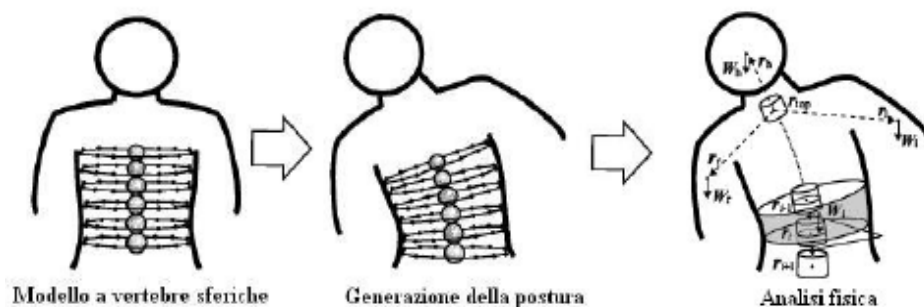


Figura 5.1 Rappresentazione del modello fisico utilizzato in [7]

In generale, la ricostruzione della struttura vertebrale assumono un'importanza rilevante per i ricercatori clinici impegnati nell'analisi della postura umana.

L'avvalersi di modelli dinamici inoltre, permette di prevedere le forze coinvolte nel movimento.

In [3] viene presentato uno studio che mostra un modello biomeccanico in-vivo della porzione cervicale della colonna vertebrale umana. Infine in [4], Ezquerro utilizza una struttura ad elementi finiti (vedi figura 5.2) per analizzare la risposta biomeccanica della porzione lombare negli istanti di maggior stress durante la camminata umana.

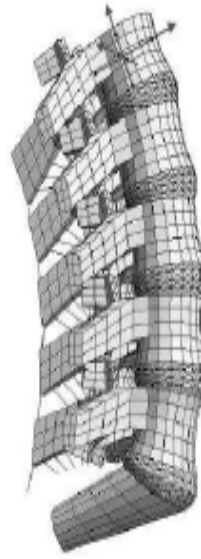


Figura 5.2 Struttura ad elementi finiti della porzione lombare

Modelli physics-based della spina dorsale nei quadrupedi sono stati raramente oggetto di studio.

In[2] è considerato lo schema tridimensionale del movimento vertebrale del cane, con particolare attenzione alla zona caudale-lombare e lombo-sacrale. In questa ricerca, grazie al confronto fra i movimenti dorsali di differenti razze canine, è emerso uno schema comune ad ogni soggetto.

Gradner [8] ha invece condotto una pura analisi cinematica della colonna spinale canina utilizzando un motion capture con markers posizionati esternamente. (Un approccio molto simile a quello scelto per questo lavoro).

I dati da lui ottenuti sono stati utilizzati per raffrontare cani clinicamente sani con altri affetti da patologie di natura ortopedica o neurologica.

Infine Marsland e Lapeer [10] hanno curato lo sviluppo di una simulazione physics-based in real-time di un cavallo al trotto. Gli autori si sono focalizzati sull'animazione completa dell'animale (vedi figura 5.3) utilizzando però una rappresentazione sensibilmente approssimata della colonna spinale.

Utilizzando un approccio simile a quello scelto per lo sviluppo di questo lavoro, i ricercatori hanno affidato il controllo del movimento ad un controllore proporzionale ottenendo comunque buoni risultati.

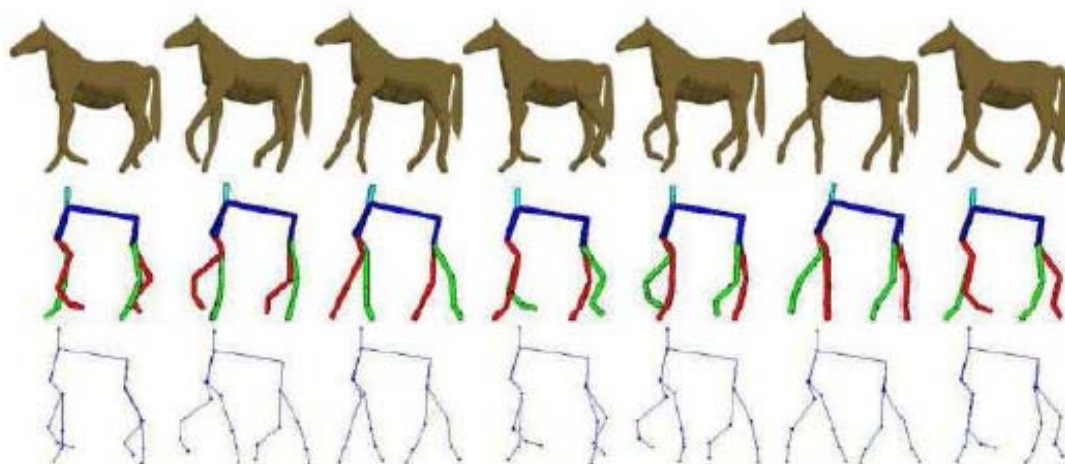


Figura 5.3 Rappresentazione grafica della struttura scheletrica approssimata utilizzata in [10]

Capitolo 6

Risultati sperimentali

Dopo lo sviluppo del software, la realizzazione dell'algoritmo di controllo e dell'interfaccia grafica ed interazione con l'utente si è giunti a quelli che possiamo considerare i risultati finali.

In questo capitolo sono presenti i risultati degli esperimenti condotti su una femmina di razza Boxer di due anni di età.

Analisi simili sono state effettuate su animali della stessa razza con risultati comparabili.

Il sistema è composto da undici elementi, uniti da giunti hinge, posizionati nel punto medio di ogni coppia.

I risultati ottenuti sono stati analizzati raffrontando la traiettoria rilevata (in condizioni stabili) e quella misurata sperimentalmente (vedi grafico 6.1, grafico 6.2, grafico 6.3 e figura 6.1).

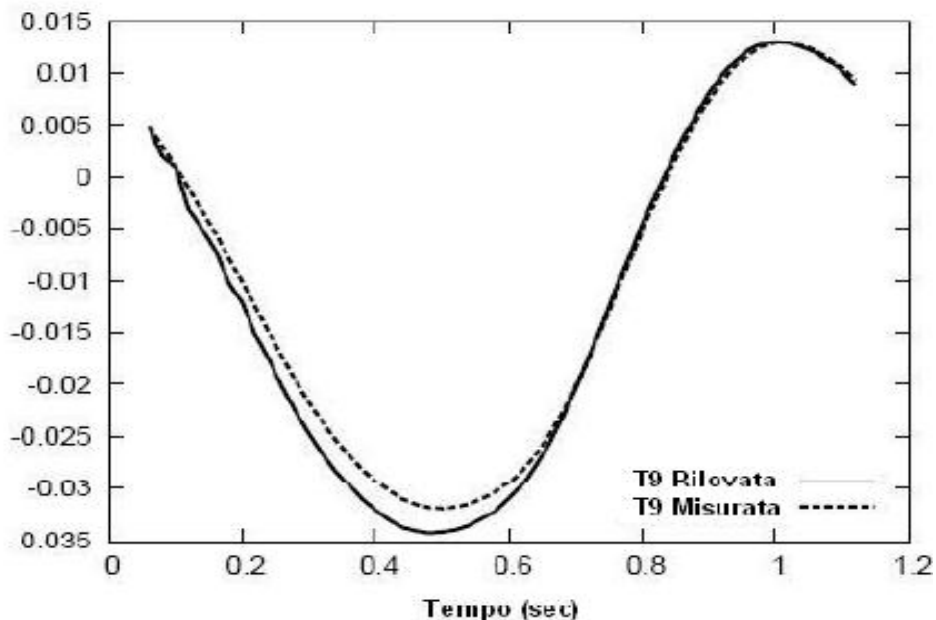


Grafico 6.1 Confronto traiettoria rilevata e misurata per la vertebra T9

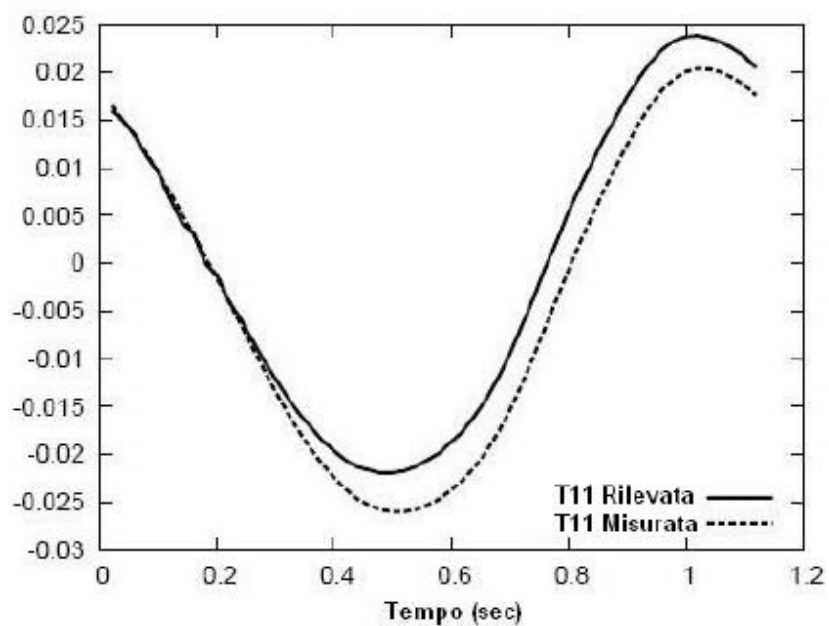


Grafico 6.2 Confronto traiettoria rilevata e misurata per la vertebra T11

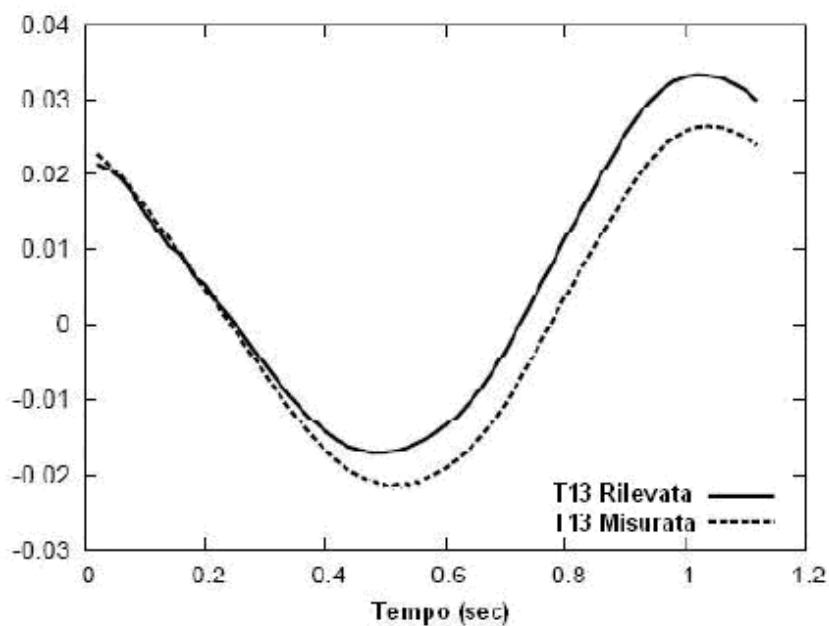


Grafico 6.3 Confronto traiettoria rilevata e misurata per la vertebra T13

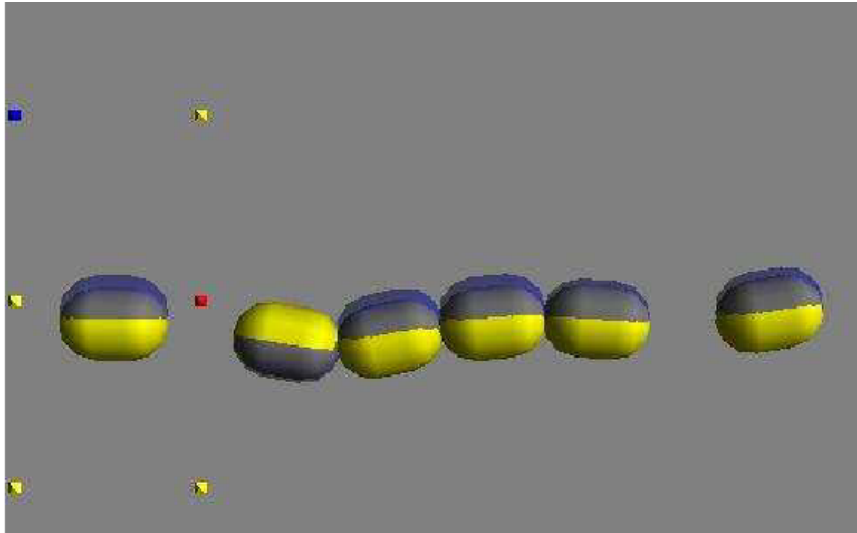


Figura 6.1 Sovrapposizione della traiettoria desiderata (in blu) alla traiettoria simulata (in giallo)

Capitolo 7

Conclusioni e discussione dei dati

Questo studio, ha avuto come scopo la ricerca di informazioni sul movimento, in toto, della colonna vertebrale in cani di razza Boxer, durante il passo e la realizzazione di una simulazione physic-based del suo movimento.

I dati biomeccanici ottenuti, utilizzando il sistema motion capture Simi, hanno dimostrato, in tutti i soggetti studiati, un movimento laterale ampio e ben definito. Queste informazioni hanno più di una valenza.

- Il movimento laterale della colonna vertebrale e anche se poco conosciuto esiste e non è di secondaria importanza. Il sapere che durante il processo di avanzamento e quindi di normale deambulazione dei cani, con le sue oscillazioni, la colonna spinale, gioca un ruolo molto importante, per quanto se ne sa sino ad oggi, in letteratura, costituisce una certa novità. I dati ottenuti, danno una visione complessivamente diversa del movimento: questo non è solo una prerogativa degli arti anteriori e posteriori degli animali. La colonna spinale potrebbe funzionare da ammortizzatore, per attutire la spinta degli arti posteriori, flettendosi, per poi restituire al corpo, l'energia accumulata e distendendosi come una molla. Questo movimento avviene in modo sincrono con quello degli arti ed agendo in sinergia con gli stessi. Queste valutazioni, potrebbero costituire una novità nelle mostre canine, in quanto i giudici valutano le andature solo tenendo conto del movimento degli arti.
- I dati raccolti, con i grafici e le valutazioni numeriche, espresse in centimetri riferiti al piano sagittale, hanno evidenziato un'ampiezza del movimento non trascurabile. Le oscillazioni nella parte posteriore, delle vertebre distali degli animali, possono essere anche di 14 cm. Se teniamo conto che l'altezza media

al garrese, dei cani di razza Boxer è di circa 45 cm, lo scostamento è circa un terzo dell'altezza: un rapporto significativo.

I valori raccolti durante lo studio, danno una spiegazione all'ampiezza di questo movimento. Dalla sequenza dei dati raccolti, a partire dalla prima toracica, notiamo un crescente allontanamento verso sinistra delle vertebre. Questo spostamento progressivo si propaga come un'onda sino alla parte posteriore dell'animale. La conseguenza è un'asimmetria della parte posteriore, ove le ultime vertebre oscillano senza mai spostarsi nella parte destra.

Questo fenomeno, ben evidenziato dallo studio, porta ad alcune considerazioni dal punto di vista anatomico. Sino ad ora si era considerato il movimento degli arti, sia anteriori che posteriori, come pendoli che si spostano sul terreno, come se si trovassero su due binari. Questa affermazione alla luce dei dati ottenuti non può più essere considerata vera.

La parte prossimale dell'arto posteriore, formata dal femore che si inserisce con la sua testa nell'acetabulo dell'anca, costituisce una delle parti fondamentali nel movimento. Si è sempre pensato che la testa del femore si muovesse normalmente solo avanti e indietro, ruotando solamente in coincidenza di un cambio di direzione.

Lo studio ha dimostrato, che l'ampia oscillazione delle vertebre posteriori e il loro non allineamento con il piano sagittale, dovrebbe sottoporre la testa del femore, durante una normale camminata in linea retta, ad una continua torsione e a un inserimento della testa del femore nell'acetabulo non simmetrico. Come prima conseguenza, abbiamo che gli angoli, che il femore forma, durante il movimento, con la colonna vertebrale sono diversi tra destra e sinistra.

Questo dato potrebbe essere di utilità in campo chirurgico. Una delle patologie più diffuse fra tutti i cani è la displasia dell'anca. Questa si risolve solo chirurgicamente e durante l'intervento di ricostruzione, potrebbe essere importante tenere conto di questo fenomeno, per poter restituire al paziente, una motilità il più vicino possibile a quella naturale.

- La descrizione dei movimenti della vertebre della colonna vertebrale ha evidenziato una serie di spostamenti molto interessanti. I dati che sono stati presentati, sono la media tra quelli ottenuti tra tutti i soggetti studiati, ma ognuno di questi presentava lo stesso tipo di movimento, espresso però con valori e tempi diversi. Durante il loro continuo movimento, durante la camminata al passo, le vertebre incrociano le loro traiettorie. Lo studio ha evidenziato i momenti e le distanze in cui avvengono.

Gli incroci che individuano un allineamento tra le vertebre in un determinato momento sono numerosi e continui. A volte questi avvenimenti, sembrano una conseguenza di un movimento logico di una serie di giunti collegati tra di loro da vincoli, a volte sembrerebbero non avere alcuna spiegazione meccanica.

Sicuramente questi *match points* meriterebbero uno studio ampio ed approfondito ed alcuni potrebbero essere dei rilevatori dello stato di salute dell'animale.

Momento di sicuro interesse risulta essere l'allineamento delle prime vertebre toraciche con le ultime lombari e la sacrale. In questo momento la schiena dell'animale forma un arco le cui estremità sono formate dalle estremità della colonna spinale. Questo avvenimento potrebbe essere spiegato come un modo per restituire l'energia accumulata, sotto la spinta degli arti posteriori.

Un'altra parte interessante è la parte centrale della colonna vertebrale. Questa formata dalle vertebre T13-L1-L3, è una zona di discontinuità, tra il segmento toracico e quello lombare, ove si passa da vertebre vincolate a vertebre fluttuanti. In questo segmento, i marcatori hanno rilevato che la colonna spinale assume una forma di V rovesciata. In questa zona la tredicesima toracica e la terza lombare sono sempre più distanti dal piano sagittale della prima vertebra lombare. Come e perché i soggetti mantengano questa forma anomala risulta di difficile spiegazione. Questa forma la si trova, anche se con leggere variazioni, in tutti gli animali studiati.

Proprio perché si trova in tutti i soggetti e questo segmento di colonna vertebrale ha un andamento anomalo, potrebbe essere in buon indicatore di eventuali patologie come la spondilosi o compressioni neuronali vertebrali.

- Utilizzando la libreria open source, è stato realizzato un modello semplificato della colonna vertebrale, composto da una catena di corpi rigidi, rappresentanti le vertebre, connessi tra di loro da giunti a forma di perno. Per ciascuna vertebra della colonna è stato progettato ed implementato un sistema di controllo in retroazione PID.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che la simulazione risulta stabile ed accurata, anche perturbando il sistema con una forza impulsiva di intensità notevole.

Sottoponendo la colonna a questa tipologia di disturbo si ottengono risultati verosimili, che potrebbero essere verificati dai dati reali.

Sviluppi futuri

- Approfondire lo studio del movimento, utilizzando lo strumento elettromiografo, sincronizzato con i dati relativi allo spostamento. Questo permetterebbe di individuare e quantificare il lavoro muscolare e quindi discriminare tra le forze usate per il movimento, tra quelle generate dalla spinta degli arti posteriori e quelle utilizzate delle fasce dei muscoli dorsali.
- Analisi del movimento in condizioni variabili; confrontando la posizione e l'intensità delle forze applicate su ciascuna vertebra con diverse inclinazioni del treadmill utilizzato per gli esperimenti.
- Progettazione di nuovi sistemi robotica che riproducano movimenti significativi del moto dei vertebrati.
- Sviluppo di un software avanzato per la diagnosi veterinaria. Per l'implementazione di tale applicativo, sarebbe indispensabile un lavoro di tabulazione delle traiettorie della colonna vertebrale di un congruo numero di soggetti sani. Una prima diagnosi potrebbe essere ottenuta confrontando fra di loro questi valori con i risultati della motion capture effettuata su animali affetti da patologie, offrendo al medico veterinario uno strumento di supporto semplice ed efficace.

Bibliografia

- [1] Curtis M. Brown. Dog locomotion and gait analysis: 1986.
- [2] M.I. Benninger, G.S. Seiler, L.E. Robinson, S.J. Ferguson, H.M. Bonel, A.R. Busato and J. Lang. Three-dimensional Motion pattern of the Caudal Lumbar and Lumbosacral Portions of the Vertebral Column of Dogs. American Journal of Veterinary Research, (65): 544-551, 2004.
- [3] C.U. de Jongh, A. H. Basson, and C. Scheffer. Dynamic Simulation of Cervical Spine following Single-Level Cervical Disc Replacement. In Proceedings of the International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, (EMBS), pages 4289-4292, Lyon, France, Aug. 2007.
- [4] F. Ezquerro, A. Simon, M.Prado, and A. Perez . Combination of Finite Element Modelling and Optimization for the Study of Lumbar Spine Biomechanics considering the 3D Thorax-pelvis orientation. Medical and Engineering and Physics, 26(1): 11-22,2004.
- [5] C.& T. Brown. The art and Science of Judging Dogs. B& E Publications, Hollywood, Ca: 1976.
- [6] E. Meyer. The Bulldog. Orange Jude Publishing Co., N.Y. 1930.
- [7] J. Miller & all. Anatomy of the Dog. W. B. Saunders Co., Philadelphia PA; 1964.
- [8] G. Gradner, B. Bockstahler, C. Di Peham, W. Hennenger and I. Podbregar. Kinematic Study of Back Movement in Clinically Sound Molinois Dogs with Consideration of the Effect of Radiographic Changes in Lombosacral Junction. Veterinary Surgery, 36(5): 472-481, 2007.

- [9] S.A. Marsland and R.J. Lapeer. Physics-based Animation of a Trotting Horse in a Virtual Environment. In IEEE Intl Conference on Information Visualisation, (IV), 398-403. Detroit, USA, July 2005.
- [10] G. Monheit, and N.I. Badler. A Kinematic Model of the Human Spine and Torso. IEEE Computer Graphics and Application, 11(2):29-38, 1991.
- [11] AA. White, MM Panjabi . The basic kinematic of the human spine. A review of past and current knowledge. Spine 3:12-20, 1978.
- [12] V. Schmid, J. Lang. Measurements on the lumbosacral junction in normal dogs and those with cauda equine compression. J Small Anim Pract 34:437-442, 1993.
- [13] HGG Townsend, DH Leach, PB Fretz. Kinematics of the equine thoracolumbar spine. Equine Vet 15:117-122, 1983.
- [14] F. Audigie, P. Puorcelot, C. Deguerce et al. Kinematics of the equine back: flexion-extension movements in sound trotting horses. Equine Vet J 30(Suppl.): 210-213, 1999.
- [15] W.R. Taylor, R.M. Ehring, G.N. Duda, et al. On the influence of soft tissue coverage in the determination of bone kinematics using skin markers. J Orthop Res 23:726-734, 2005.
- [16] C. Robert, F Audigie, J.P. Vallette, et al. Effects of treadmill speed on the mechanics of the back in the trotting saddle-horse. Equine Vet J (Suppl.): 154-159, 2001.

- [17] M. Faber, H.G. Schamhardt, P.R. Van Weeren. Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses walking on treadmill. *Am j Vet Res* 61:399-409, 2000.

- [18] D.L. Benoit, D.K. Ramsey, M. Lamontagne. Effect of skin movement artefact on knee kinematics during gait and cutting motions measured in vivo. *Gait Posture* 24:152-164, 2006.

- [19] NJH Sharp, SJ Wheeler. *Small animal Spinal Disorders*. Mosby, Edinburgh,2005.

- [20] M. Faber, H. Schamhardt, R. van Weeren & all. Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses walking on a treadmill. *Am J Vet Res* 61: 399-406, 2000.