



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE MEDICHE E CHIRURGICHE

CORSO DI LAUREA IN
TECNICHE DI RADIOLOGIA MEDICA, PER IMMAGINI E RADIOTERAPIA

SURFACE GUIDED RADIATION THERAPY: IL RUOLO DEL TSRM NEI CONTROLLI DI QUALITÀ CON FANTOCCIO DINAMICO

Relatore

Prof. Filippo Mosconi

Laureando

Tommaso Mughetti

I Sessione Ottobre 2024

Anno Accademico 2023/2024

Indice	5
Elenco delle Figure e Tabelle	6
Parte Prima	8
1. Introduzione alla Radioterapia.....	8
1.1 La Storia della Radioterapia.....	8
2. Surface Guided Radiation Therapy (SGRT).....	10
2.1 Evoluzione della SGRT nel corso degli anni.....	11
2.2 Vantaggi, svantaggi e criticità della SGRT.....	12
2.3 Soluzioni disponibili di SGRT e confronto tra di esse.....	14
3. Il ruolo del tecnico di radioterapia in fase di TC di Centrazione.....	19
Parte Seconda	23
1. Fantoccio dinamico per SGRT, descrizione e scheda tecnica.....	23
2. Acquisizione dei segnali sinusoidali.....	27
3. Acquisizione e simulazione di un segnale reale.....	30
4. Conclusioni.....	34
Bibliografia e Sitografia	37

Elenco delle Figure e Tabelle

Figura 1: Sistema a 6 gradi di libertà in AlignRT Advance.....	10
Figura 2: Sensore Catalyst di C-RAD.....	14
Figura 3: Sistema radioterapico LINAC + Catalyst.....	15
Figura 4: Sistema Sentinel presente all'IRST di Meldola.....	15
Figura 5: Sensore AlignRT di VisionRT.....	16
Figura 6: Un'unità di telecamere e sensori Identify di Varian.....	17
Figura 7: Sistema SGRT comprendente sensori Identify in un LINAC Varian.	18
Figura 8: Fantoccio dinamico per SGRT (CIRS Dynamic Phantom)	23
Figura 9: Asta polmonare con all'interno il bersaglio sferico.....	24
Figura 10: Tomografia Computerizzata (TC) del fantoccio con all'interno il bersaglio sferico.....	24
Figura 11: Interfaccia software di controllo.....	25
Figura 12: Rappresentazione grafica della sinusoide impostata sul fantoccio..	27
Figura 13: Relazione tra la sinusoide iniziale e la curva finale (con T=4 sec)..	28
Figura 14: Relazione tra la sinusoide iniziale e la curva finale (con T=2 sec)..	29
Figura 15: Acquisizione respiro su un paziente reale.....	30
Figura 16: Interfaccia software Sentinel con superficie del paziente.....	30
Figura 17: Grafico paziente reale.....	31
Tabella 1: Specifiche tecniche Dynamic Phantom 008A.....	26
Tabella 2: Dati acquisiti tramite le onde sinusoidali.....	29
Tabella 3: Dati acquisiti sul paziente reale.....	32

Parte Prima

1. Introduzione alla Radioterapia

La radioterapia è una disciplina medica specialistica consistente nell'utilizzo di radiazioni ionizzanti, il cui obiettivo principale è la terapia loco-regionale dei tumori o dei sintomi ad esso correlati. Con loco-regionale si intende un trattamento mirato alla malattia, mirato ad un determinato volume. In ambito oncologico la radioterapia può essere utilizzata da sola, soprattutto negli stadi iniziali della patologia, o associata a chemioterapia e chirurgia.

1.1 La storia della radioterapia

La storia della radioterapia è strettamente legata alla scoperta delle radiazioni e all'evoluzione della fisica e della medicina. La medicina utilizza la radioterapia come trattamento in ambito oncologico da più di 100 anni, con le sue prime radici tracciate dalla scoperta dei raggi X nel 1895 da Wilhelm Röntgen. Nel 1903 Marie Curie introdusse l'uso del radio per trattamenti medici, particolarmente nel trattamento del cancro. Si sviluppano metodi per impiantare sorgenti di radio vicino ai tumori, pratica conosciuta come brachiterapia.

Successivamente l'uso di tubi a raggi X e generatori di tensione sempre più elevata migliorò la precisione e l'efficacia della radioterapia avendo inoltre minori effetti collaterali. Nel 1953 l'invenzione dell'acceleratore lineare permise la generazione di fasci di elettroni e raggi X con energie molto più elevate rispetto ai metodi precedenti. Questo strumento consentì trattamenti più precisi e mirati, riducendo il danno ai tessuti sani circostanti e aumentando l'efficacia nel trattamento dei tumori profondi.

Negli anni '70 e '80, lo sviluppo di tecniche di imaging avanzate come la tomografia computerizzata (TC) e la risonanza magnetica (RM) migliorò notevolmente la pianificazione dei trattamenti radioterapici. Questo permise ai medici di visualizzare i tumori con grande precisione e di modellare i fasci di radiazioni per conformarsi alla forma del tumore.

Negli anni '90 nacquero la radioterapia conformazionale tridimensionale (3D-CRT) e la radioterapia a intensità modulata (IMRT). Queste metodiche permisero, e permettono tuttora di modellare i fasci di radiazioni con precisione ancora maggiore, riducendo ulteriormente il danno ai tessuti sani. Tecniche ancora più recenti come la radioterapia guidata dalle immagini (IGRT), la radioterapia stereotassica (SRS e SBRT) e la protonterapia, offrono ulteriori miglioramenti in termini di precisione e riduzione degli effetti collaterali.

L'introduzione della radioterapia guidata dalle immagini (IGRT) nei primi anni 2000 ha offerto importanti miglioramenti in termini di accuratezza dei trattamenti radioterapici. Nonostante questi progressi, le capacità di imaging intra-frazione dei sistemi IGRT basati sul LINAC erano ancora limitate, dando origine a una tecnica complementare per il monitoraggio dei pazienti intra-frazione: la radioterapia guidata dalla superficie (SGRT).

2. Surface Guided Radiation Therapy (SGRT)

La radioterapia guidata dalla superficie (SGRT) (talvolta definita radioterapia guidata da immagini di superficie) è il processo che utilizza l'imaging 3D per posizionare e tracciare i movimenti dei pazienti sottoposti a radioterapia durante il trattamento. Si basa sull'utilizzo di un numero variabile di telecamere (solitamente tre) posizionate attorno al paziente. Esse captano i raggi infrarossi proiettati sul paziente in modo tale da valutare il posizionamento di quest'ultimo istante per istante, confrontandolo con quello acquisito in fase di centratura.

Poiché la superficie di riferimento è definita rispetto all'isocentro del trattamento, gli algoritmi calcolano le traslazioni e le rotazioni in sei gradi di libertà (lateral, longitudinal, vertical, yaw, roll, pitch) (Figura 1) necessarie per correggere la posizione del paziente in tempo reale. Nelle aree anatomiche in cui la superficie del paziente è adatta per il bersaglio della radioterapia, come nel caso del seno e del cervello¹, l'imaging superficiale è stato rapidamente integrato nella pratica clinica grazie alla sua elevata precisione temporale e spaziale.

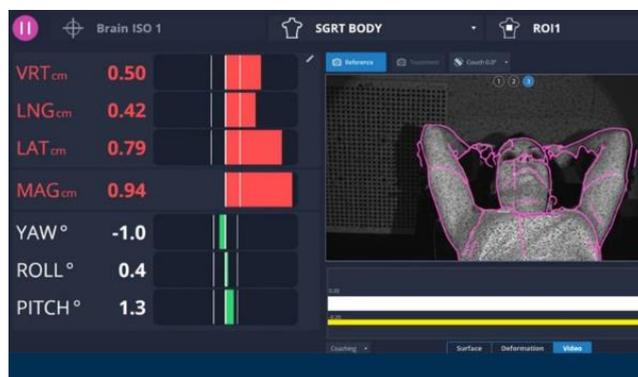


Figura 1: Sistema a 6 gradi di libertà in AlignRT Advance

¹ Nel trattamento di tumori cerebrali o altri bersagli intracranici, la forma della superficie del cranio fornisce una mappa precisa della posizione del cervello e delle strutture vicine. Questo rende la superficie della testa un eccellente riferimento per il posizionamento del paziente. Anche la superficie del seno riflette fedelmente la posizione dei tumori mammellari.

2.1 Evoluzione della SGRT nel corso degli anni

La Surface Guided Radiation Therapy (SGRT) è una tecnologia relativamente recente che ha rivoluzionato il campo della radioterapia, migliorando la precisione del trattamento e riducendo gli effetti collaterali. Nacque come risposta alla necessità di migliorare la precisione dei trattamenti radioterapici.

Tradizionalmente, la radioterapia utilizzava tecniche di imaging statico, come i raggi X o la tomografia computerizzata (CT), per localizzare i tumori e pianificare il trattamento. Tuttavia, queste tecniche presentavano limitazioni nel monitorare i movimenti del paziente e del tumore durante il trattamento.

Negli anni 2000, le innovazioni nel campo del monitoraggio tridimensionale e della tecnologia ottica hanno permesso lo sviluppo dei primi sistemi di SGRT. Questi sistemi utilizzavano telecamere stereoscopiche e proiezioni di luce strutturata per creare un modello 3D della superficie del paziente in tempo reale che poteva essere confrontato con le immagini di riferimento acquisite durante la pianificazione del trattamento. Eventuali differenze tra la posizione del paziente e quella di riferimento venivano immediatamente rilevate, permettendo di correggere la posizione prima e durante l'erogazione della radiazione.

Con l'avanzamento della tecnologia, la SGRT ha trovato applicazione in una varietà di trattamenti oncologici: tumore al seno (riduzione dell'uso di marcatori metallici e miglioramento della precisione del trattamento), tumori polmonari (miglior monitoraggio del movimento respiratorio, permettendo trattamenti più precisi), radioterapia stereotassica (SRT) e radioterapia corporea stereotassica (SBRT) (permette trattamenti ad alte dosi con estrema precisione).

La SGRT continua a evolversi, con ricerche in corso per migliorare ulteriormente la precisione e l'efficacia del trattamento. Un ruolo importante sarà quello dell'intelligenza artificiale che risulterà molto utile per migliorare l'utilizzo di una tecnologia avanzata come quella della SGRT. Inoltre, sarà fondamentale rendere la SGRT un sistema portatile e accessibile a un numero maggiore di centri medici.

2.2 Vantaggi, svantaggi e criticità della SGRT

Tra i vantaggi della SGRT abbiamo sicuramente l'alta precisione e accuratezza. Infatti, la SGRT può rilevare e correggere movimenti del paziente con una precisione submillimetrica, migliorando la precisione del trattamento. Inoltre, come già citato in precedenza, questa tecnologia prevede un monitoraggio in tempo reale del paziente durante il trattamento e in questo modo si riduce drasticamente il rischio di errori di posizionamento.

Un altro vantaggio dato dalla grande precisione di questa tecnologia è quello di minimizzare l'esposizione alle radiazioni dei tessuti sani, riducendo il rischio di effetti collaterali. Utilizzando gating respiratorio è possibile trattare tumori in distretti complicati dal punto di vista di respirazione come, per esempio, tumori presenti nel torace o nell'addome superiore.

La SGRT non richiede l'uso di marcatori o tatuaggi sulla pelle, riducendo il disagio per il paziente ed evitando segni permanenti. Inoltre, non essendo necessarie procedure invasive o fastidiose, il comfort del paziente è significativamente migliorato grazie all'utilizzo della SGRT.

La SGRT ha anche il vantaggio di essere compatibile con altri sistemi di imaging. Infatti, può essere utilizzata in combinazione con altre tecnologie come CT, MRI e PET.

Infine, la Surface Guided Radiation Therapy ha una grandissima efficienza operativa. Oltre a garantire una riduzione dei tempi di allineamento grazie all'eliminazione dei marcatori fisici, ha un'ottima flessibilità e facilità di implementazione. Infatti, può essere integrata in vari workflow clinici senza richiedere modifiche invasive.

Nonostante i numerosi vantaggi che ha portato la nascita e l'introduzione della SGRT nei trattamenti radioterapici, questa tecnica presenta anche alcuni svantaggi e criticità.

Lo svantaggio tecnico più importante è quello legato alla difficoltà nella localizzazione di tumori profondi. La SGRT è meno precisa per il monitoraggio di tumori situati in profondità rispetto a quelli più superficiali, poiché si basa sul tracciamento della superficie esterna del corpo. Inoltre, è sensibile ai cambiamenti nella superficie corporea del paziente (ad esempio, variazioni del peso corporeo) e questo può influire negativamente sulla precisione. È necessaria anche un'immobilizzazione perfetta in un trattamento con SGRT. Se l'immobilizzazione del paziente non è eseguita correttamente, la SGRT può perdere precisione. Questo può succedere nel caso di pazienti non collaboranti, che potrebbero essere pazienti anziani o pazienti con difficoltà motorie.

Infine, questa tecnologia è dipendente dalle condizioni di luce e ambiente: la qualità delle immagini ottenute può essere influenzata dalle condizioni di illuminazione della stanza di trattamento e inoltre, polvere, riflessi o altre interferenze ambientali possono alterare la qualità delle immagini e la precisione del posizionamento.

L'implementazione della SGRT richiede un investimento significativo in termini di hardware, software e formazione del personale. Oltre agli elevati costi d'implementazione, bisogna tenere conto dei costi operativi e di manutenzione. L'uso della SGRT richiede personale altamente qualificato e addestrato, il che può rappresentare una sfida, soprattutto nei centri più piccoli.

2.3 Soluzioni disponibili di SGRT e confronto tra di esse

System (Vendor)	Treatment unit [#] hardware	CT Simulator system (vendor)	Patient identification	Patient biofeedback	Patient positioning Corrections
AlignRT (Vision RT)	1 to 3 cameras units (~90° apart)	GateCT (Vision RT)	Infrared facial recognition	Visual (Real-time coach)	6D
Catalyst (C-RAD)	1 to 3 cameras units (120° apart)	Sentinel* 4DCT (C-RAD)	Facial recognition	Audio & visual (Goggles)	6D
IDENTIFY (Varian)	3 cameras units (~90° apart)	IDENTIFY CT (Varian)	Palm reader	Visual coaching module	6D

[#]Each unit may contain more than one camera.
^{*}Uses laser scanning technology.

Le tre principali soluzioni commerciali di SGRT sono Catalyst™ di C-RAD, AlignRT® di Vision RT e Identify di Varian. Ogni sistema ha i suoi punti di forza e le sue debolezze e la scelta del sistema giusto dipende dalle specifiche esigenze cliniche, dal budget disponibile e dalla struttura operativa del centro radioterapico.

Dal punto di vista di tecnologia di imaging ottico Catalyst utilizza un sistema basato sulla proiezione di luce strutturata. Questa tecnica prevede la proiezione di un pattern di luce sulla superficie del paziente. Le deformazioni del pattern, causate dalle irregolarità della superficie corporea, vengono catturate da telecamere stereoscopiche che ricostruiscono l'immagine 3D della superficie. Le telecamere stereoscopiche lavorano insieme per fornire una visione tridimensionale precisa. Queste telecamere acquisiscono immagini da diverse angolazioni (tipicamente disposte in modo da formare un angolo di circa 120 gradi tra loro²), permettendo di calcolare le coordinate spaziali 3D della superficie del paziente con alta precisione.



Figura 2: Sensore Catalyst di C-RAD³

² Ogni unità (solitamente 3) possono comprendere più di una telecamera.

³ Le telecamere stereoscopiche sono posizionate nelle estremità e lavorano in sinergia per acquisire la superficie del paziente



Figura 3: Sistema radioterapico LINAC + Catalyst

In sede di TC di centratura e durante il setup iniziale del paziente viene utilizzato un'altra apparecchiatura di C-RAD ovvero Sentinel. Utilizza anch'esso luce strutturata e telecamere ottiche per acquisire immagini 3D della superficie del paziente, ma con un focus maggiore sulla fase di setup e simulazione. La tecnologia è progettata per essere utilizzata durante la simulazione TC o RM, permettendo di sincronizzare i movimenti respiratori con la raccolta delle immagini. Sentinel fornisce informazioni sul gating respiratorio durante la fase di simulazione e pianificazione. È particolarmente utile per comprendere come il movimento respiratorio influenzi la posizione del tumore e per impostare i parametri di gating che verranno utilizzati durante il trattamento.



Figura 4: Sistema Sentinel presente all'IRST di Meldola

Il sistema Catalyst utilizza delle tecnologie innovative per effettuare la “Patient Identification” e per ricevere il “Patient Biofeedback”. Durante la fase di setup iniziale, il sistema Catalyst cattura una scansione 3D del volto del paziente utilizzando le telecamere stereoscopiche e la luce strutturata. Questa immagine tridimensionale viene salvata come riferimento e ogni volta che il paziente si sottopone a una sessione di trattamento, il sistema utilizza le sue telecamere per acquisire nuovamente un’immagine del volto del paziente. Infine, vengono confrontate fra di esse le immagini per verificare che il paziente sia quello giusto.

Il Patient Biofeedback fornisce un feedback visivo o auditivo al paziente in base alla sua respirazione. Questo può aiutare il paziente a controllare il proprio respiro, mantenendolo entro un intervallo specifico, come richiesto dal piano di trattamento.

AlignRT utilizza una tecnologia di imaging ottico leggermente diversa da Catalyst. Un proiettore di luce strutturata integrato nel sistema proietta un pattern casuale composto da macchie (speckle pattern) sul paziente e l’immagine di queste macchie viene catturata dalle telecamere stereoscopiche posizionate attorno al paziente ad un’angolazione di circa 90°. La deformazione del pattern quando si riflette sulla superficie tridimensionale del paziente permette di ricostruire con precisione la forma e la posizione della superficie corporea. Questa immagine viene poi inviata al software del sistema per avere informazioni riguardo ai cambiamenti di posizione del paziente.



Figura 5: Sensore AlignRT di VisionRT

Come nel caso di C-RAD anche VisionRT ha predisposto l'utilizzo di un sensore differente durante la fase di TC di centratura rispetto a quello utilizzato durante il trattamento. Se nel caso di C-RAD l'apparecchiatura è Sentinel, VisionRT utilizza GateCT. Le funzionalità sono pressoché le stesse di Sentinel. GateCT consente di monitorare in tempo reale la superficie del paziente mentre viene acquisita la scansione TC, fornendo informazioni dettagliate sul movimento del paziente (in particolare sul respiro). È particolarmente utile per i trattamenti di radioterapia in cui il movimento respiratorio può influenzare il posizionamento dell'area bersaglio, come nel caso dei polmoni o del seno.

La tecnologia ottica di Identify, il terzo e ultimo sistema SGRT che andrò a descrivere è la stessa di AlignRT. Identify utilizza una tecnologia combinata che include la proiezione di luce strutturata, ma è supportata da laser e telecamere a infrarossi. Questa combinazione migliora la precisione e la capacità di catturare immagini della superficie del paziente in condizioni diverse. Le telecamere, combinate in unità e disposte a 90° le une dalle altre, lavorano in sinergia.



Figura 6: Un'unità di telecamere e sensori Identify di Varian



***Figura 7: Sistema SGRT comprendente sensori Identify in un LINAC
Varian***

Nella fase di TC di centratura viene utilizzato IdentifyCT, sempre di Varian. L'identificazione del paziente viene effettuata tramite un "palm reader", scanner infrarossi che identificano il palmo della mano del paziente in maniera univoca.

3. Il ruolo del tecnico di radiologia nella TC di Centrazione

In radioterapia, il workflow del paziente segue una serie di fasi ben precise che richiedono l'intervento coordinato di un team multidisciplinare. Il Tecnico Sanitario di Radiologia Medica (TSRM) gioca un ruolo cruciale in diverse tappe di questo percorso, dalla TC di centratura fino all'erogazione del trattamento vero e proprio.



Il processo inizia con la valutazione clinica del paziente, dove il medico radioterapista raccoglie le informazioni cliniche e stabilisce l'indicazione al trattamento.

Successivamente, il paziente viene sottoposto alla TC di Centrazione nella quale verranno acquisiti i dati anatomici/densitometrici (TC o TC/PET) e inoltre, questa è il momento in cui avviene il primo contatto tra TSRM e il paziente. In questa fase, il TSRM assume un ruolo centrale nella preparazione tecnica del paziente, assicurando il corretto posizionamento e l'immobilizzazione, fondamentali per garantire la riproducibilità delle condizioni nel corso delle successive sedute di radioterapia.

Il TSRM, grazie alla sua competenza nell'uso delle apparecchiature di imaging, è responsabile della realizzazione delle immagini di simulazione, in particolare delle TC o, in alcuni casi, delle risonanze magnetiche (RM) o delle tomografie a emissione di positroni (PET). Queste immagini vengono successivamente utilizzate dal fisico medico e dal radioterapista per definire il volume bersaglio, i

volumi di rischio, ossia le aree da trattare e quelle da proteggere e la pianificazione/ottimizzazione del piano di trattamento . Il TSRM deve garantire che le immagini siano di alta qualità e acquisite in modo conforme al protocollo, poiché un errore in questa fase potrebbe compromettere l'intera pianificazione del trattamento. In questa fase il TSRM utilizza i sistemi di SGRT per rendere riproducibile il trattamento.

Compiti del tecnico in fase di TC di centratura:

1. “Studio” della cartella clinica: pregressi, precedente RT, patologie particolari, ecc...
2. Corretta identificazione del paziente;
3. Spiegare in maniera chiara l'eventuale preparazione che il paziente deve effettuare⁴;
4. Impostazione corretta dei dati anagrafici e dello studio da eseguire;
5. Immobilizzazione del paziente tramite i SIR tenendo conto di:
 - a. Indicazioni del medico (retro foglio di setup⁵);
 - b. Protocolli standardizzati dell'U.O.;
 - c. Stato psicofisico del paziente.
6. Posizionamento dei reperi radiopachi nella regione di interesse;
7. Acquisizione immagini;
8. Trasferimento alla rete Pacs interna/Sistema TPS;
9. Tatuaggi per il corretto riposizionamento;
10. Corretta compilazione del foglio di setup.

⁴ Per esempio la vescica deve essere piena o vuota per i trattamenti che coinvolgono l'area pelvica (prostata, vescica, tumori ginecologici) oppure il paziente deve essere a digiuno per trattamenti che coinvolgono la zona dell'addome.

⁵ Il foglio di setup viene compilato dal TSRM in sede di TC di centratura e viene consultato prima di ogni trattamento. Ogni dubbio riguardante la compilazione va discusso con il medico radioterapista.

Una volta completata la fase di TC di centratura e simulazione, le immagini vengono importate nel sistema di pianificazione dosimetrica, dove il TSRM potrebbe collaborare con il fisico medico per ottimizzare la geometria del trattamento, assicurandosi che i parametri tecnici, come gli angoli di incidenza dei fasci e la distribuzione della dose, siano corretti.

Durante la fase di trattamento, il TSRM riveste un ruolo essenziale nella gestione operativa della seduta di radioterapia. Prima di ogni seduta, il TSRM prepara l'apparecchiatura, verifica il corretto posizionamento del paziente e controlla i parametri del trattamento pianificato, come la dose e la durata dell'erogazione. Utilizzando tecniche di imaging integrato, come la radiografia digitale o la tomografia a fascio conico (CBCT), il TSRM esegue una verifica preliminare del posizionamento per confermare che il paziente si trovi esattamente nella posizione stabilita durante la TC di centratura. Eventuali discrepanze vengono corrette in tempo reale tramite l'SGRT, assicurando che la radioterapia sia erogata con precisione millimetrica.

L'interazione tra TSRM e paziente non si limita agli aspetti tecnici. Durante le numerose sedute di trattamento, il TSRM ha il compito di monitorare costantemente il paziente, sia dal punto di vista fisico che psicologico. Un buon rapporto con il paziente può facilitare la corretta esecuzione delle sedute, minimizzando lo stress e migliorando la collaborazione del paziente, il che è essenziale per il successo del trattamento. Inoltre, il TSRM è tenuto a documentare ogni fase del trattamento, registrando le dosi somministrate e segnalando eventuali anomalie o reazioni del paziente.

Infine, nella fase di post-trattamento, il TSRM partecipa alle eventuali operazioni di follow-up, nelle quali si verifica l'efficacia della terapia tramite esami quali TC, RM o PET.

Il successo della radioterapia e quindi la guarigione del paziente non dipendono solamente dalla qualità della pianificazione valutata dal medico radioterapista, ma anche dalla qualità e dalla precisione del trattamento svolta dal tecnico di radiologia. È compito del tecnico svolgere al meglio questa fase, garantendo

un'erogazione sicura, precisa ed efficace. La sua competenza tecnica, unita alla capacità di gestire la relazione con il paziente, lo rende una figura insostituibile all'interno del percorso terapeutico. Ogni fase, dalla TC di centratura agli ultimi esami di follow-up, è di grandissima importanza e deve essere gestita in maniera impeccabile dal tecnico.

Parte Seconda

In questa seconda parte andrò a descrivere una tipologia di fantoccio dinamico utilizzato in ambito della Surface Guided Radioterapy, il Dinamic Phantom model 0008A della Sun Nuclear. All'interno dell'IRST di Meldola, abbiamo effettuato uno studio utilizzando questo fantoccio. L'obiettivo era quello di verificare se il sensore Sentinel™ di Tecnosan acquisisse correttamente l'onda sinusoidale impostata in precedenza sul fantoccio. Inoltre, abbiamo effettuato uno studio anche utilizzando un paziente volontario sano e abbiamo controllato se, anche in questo caso, il sensore Sentinel acquisisse correttamente il respiro.

1. Fantoccio dinamico per SGRT, descrizione e scheda tecnica

Il Dynamic Phantom modello 008A è un fantoccio altamente specializzato, realizzato e prodotto dalla Sun Nuclear e progettato per simulare il movimento del tumore all'interno del torace umano, in particolare nei polmoni, durante trattamenti di radioterapia guidata. Il modello 008A replica fedelmente le dimensioni e la forma del torace umano, utilizzando materiali che hanno densità e proprietà fisiche simili a quelle dei tessuti umani, rendendolo ideale per calibrazioni, test e ricerche in ambito medico.



Figura 8: Fantoccio dinamico per SGRT (CIRS Dynamic Phantom)

Il cuore del sistema è un'asta polmonare equivalente che attraversa il corpo del fantoccio. Questa asta contiene un bersaglio sferico (di densità differente rispetto all'asta) che simula la posizione di un'eventuale massa all'interno dei polmoni (**Figura 9**). L'asta polmonare è collegata a un attuatore di movimento che permette sia la traslazione lineare sia la rotazione, consentendo di riprodurre fedelmente il movimento del tumore durante il ciclo respiratorio. Fondamentale specificare che l'asta polmonare, avendo densità identica a quella circostante, non verrà riconosciuta come "in movimento" dalle apparecchiature di imaging. Invece il bersaglio, che ha una densità diversa, è chiaramente visibile durante le scansioni di imaging, permettendo agli operatori di osservare e misurare con precisione il movimento del tumore.

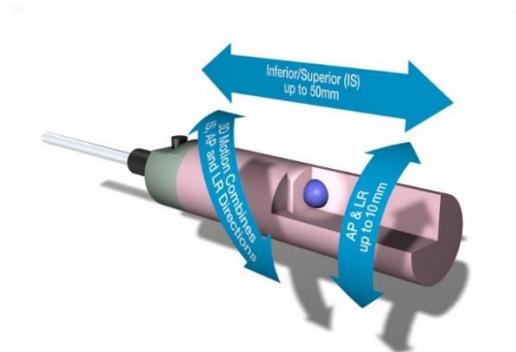


Figura 9: Asta polmonare con all'interno il bersaglio sferico

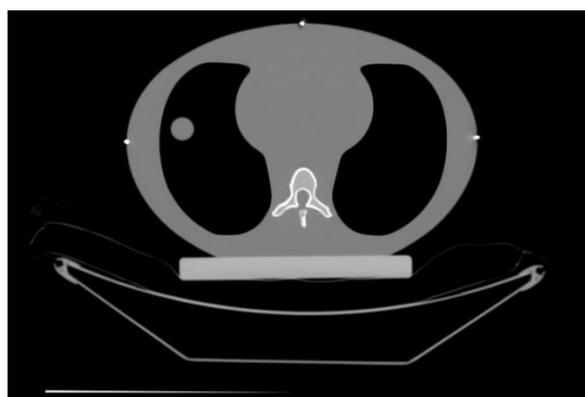


Figura 10: Tomografia Computerizzata (TC) del fantoccio con all'interno il bersaglio sferico

L'asta polmonare ha la possibilità di gestire diversi movimenti (**Figura 9**). In primo luogo la traslazione lineare: l'asta può muoversi avanti e indietro lungo un

asse, simulando il movimento cranio-caudale (IS), tipico della respirazione profonda. L'asta può effettuare anche movimenti antero-posteriori (AP) e latero-laterali (RL) con un'escursione di ± 10 mm. Un altro movimento che può effettuare è la rotazione. Infatti, l'asta è in grado di ruotare per simulare il movimento rotazionale del tumore all'interno dei polmoni durante la respirazione. Utilizzando questo tipo di movimenti, può essere impostato un movimento tridimensionale combinato: l'asta può combinare traslazioni e rotazioni per riprodurre movimenti complessi su più assi, che rappresentano le dinamiche realistiche del tumore durante la respirazione.

Oltre all'asta polmonare, collegato al fantoccio, è presente una piccola piastra che effettua movimenti in antero-posteriore⁶ con escursione di ± 25 mm. Per effettuare il nostro studio abbiamo utilizzato solamente il movimento di questo "surrogato".

Ogni tipo di movimento è gestito attraverso un software di controllo programmabile (**Figura 11**). Il software consente di scegliere tra diverse forme d'onda preimpostate (come sinusoidi, cosenoidi, ecc.) o di importare profili di movimento personalizzati. Questo permette di simulare movimenti respiratori realistici e complessi, adattandosi a profili respiratori specifici del paziente, aumentando così l'efficacia dei test di qualità delle apparecchiature di imaging e dei piani di trattamento radioterapico.

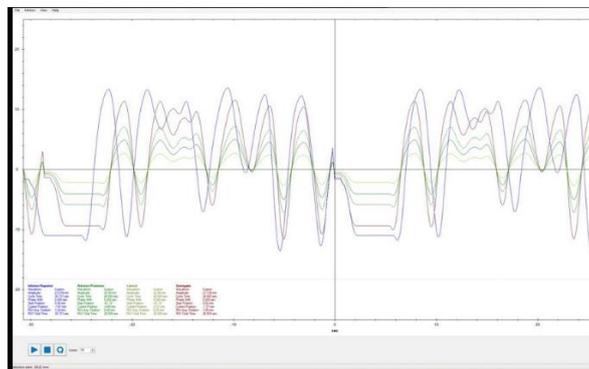


Figura 11: *Interfaccia software di controllo*

⁶ All'interno del software questo tipo di movimento è chiamato "Surrogate".

Il Dynamic Phantom 008A è uno strumento molto utile per i centri di radioterapia che necessitano di simulare e compensare i movimenti tumorali durante i trattamenti. La sua capacità di riprodurre con alta precisione il movimento del tumore consente di verificare la precisione delle tecniche di imaging (come la tomografia computerizzata (TC) o la risonanza magnetica (RM)) e dei sistemi di erogazione della radiazione, assicurando che il fascio radiante venga sempre diretto con esattezza sul tumore nonostante i movimenti respiratori. Inoltre, il fantoccio supporta vari tipi di rilevatori che possono essere inseriti nel volume tumorale per raccogliere dati dettagliati sulle dosi di radiazione effettivamente ricevute.

Tabella 1: Specifiche tecniche Dynamic Phantom 008A

Dimensioni	67 cm x 32 cm x 28 cm
Peso	17,2 kg
Ampiezza escursione (IS)	± 25 mm
Ampiezza escursione (AP/LR)	± 5 mm
Ampiezza escursione surrogato	± 25 mm
Carico massimo piattaforma surrogato	5,4 kg
Precisione movimento	$\pm 0,1$ mm
Forme d'onda disponibili	sin(t), 1-2cos4(t), 1-2cos6(t), sawtooth, sharkfin, import di segnali esterni

2. Acquisizione dei segnali sinusoidali

Per iniziare lo studio abbiamo impostato all'interno del software di controllo del Dynamic Phantom 008A un'onda sinusoidale con ampiezza 10 mm e di periodo 4 secondi. Successivamente tramite il sistema Sentinel presente all'interno della sala TC abbiamo registrato il movimento del fantoccio. I dati acquisiti sono stati poi inviati al software di controllo che ha messo in movimento il fantoccio. Abbiamo registrato anche questo movimento e infine abbiamo messo in relazione le due curve, la sinusoide iniziale e la curva finale.

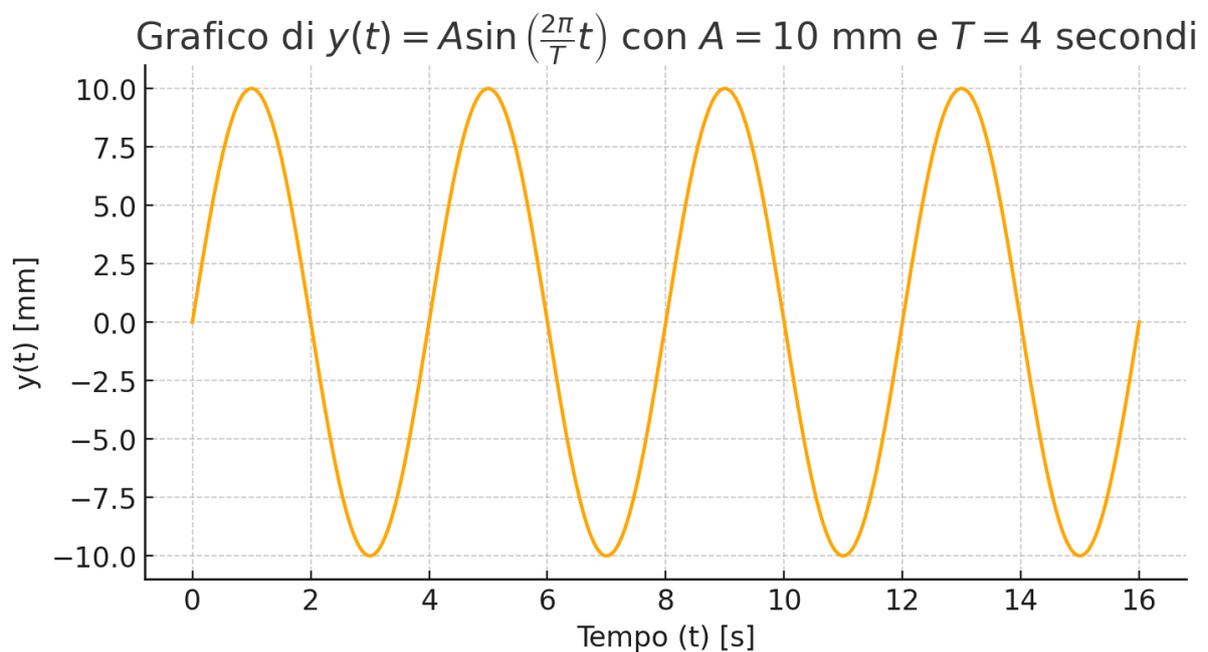


Figura 12: Rappresentazione grafica della sinusoide impostata sul fantoccio

La sinusoide impostata ha funzione:

$$y(t) = A * \sin\left(\frac{2\pi}{T} * t\right)$$

Dove:

y(t): il valore della funzione nel tempo t

A: l'ampiezza dell'onda, cioè il valore massimo che la funzione y(t) può raggiungere. Determina quanto è alta o bassa l'oscillazione.

T: il periodo dell'onda (cioè il tempo che impiega per completare un ciclo completo). Il termine $\frac{2\pi}{T}$ determina la velocità dell'oscillazione.

t: il tempo, la variabile indipendente.

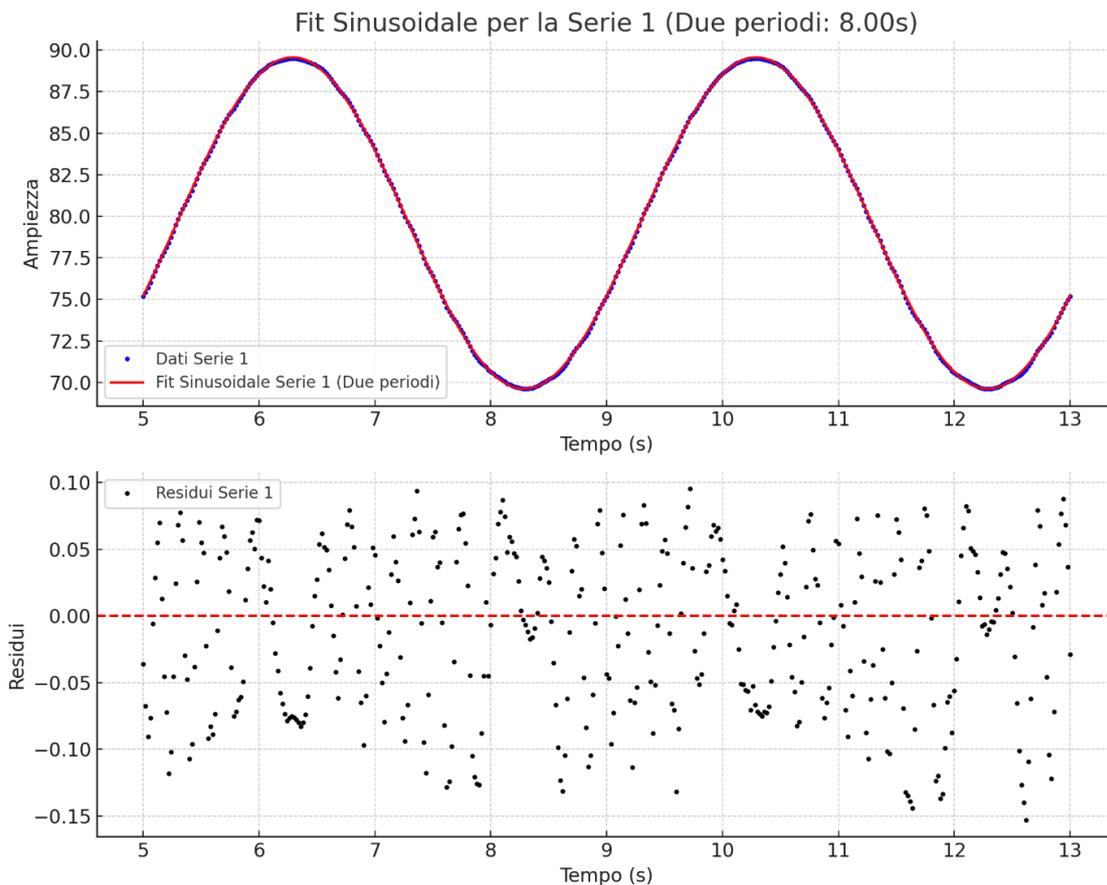


Figura 13: Relazione tra la sinusoide iniziale e la curva finale (con $T=4$ sec)⁷

Lo stesso procedimento è stato svolto con una curva sinusoidale di stessa ampiezza ma di periodo T dimezzato (2 secondi).

⁷ La curva di colore rosso rappresenta la sinusoide impostata inizialmente tramite il software mentre i puntini di colore blu rappresentano i dati raccolti dal sistema Sentinel. Nel grafico inferiore è rappresentato il “residual” che corrisponde alla differenza puntuale tra il valore impostato (onda sinusoidale) e il calore misurato (segnale acquisito da Sentinel).

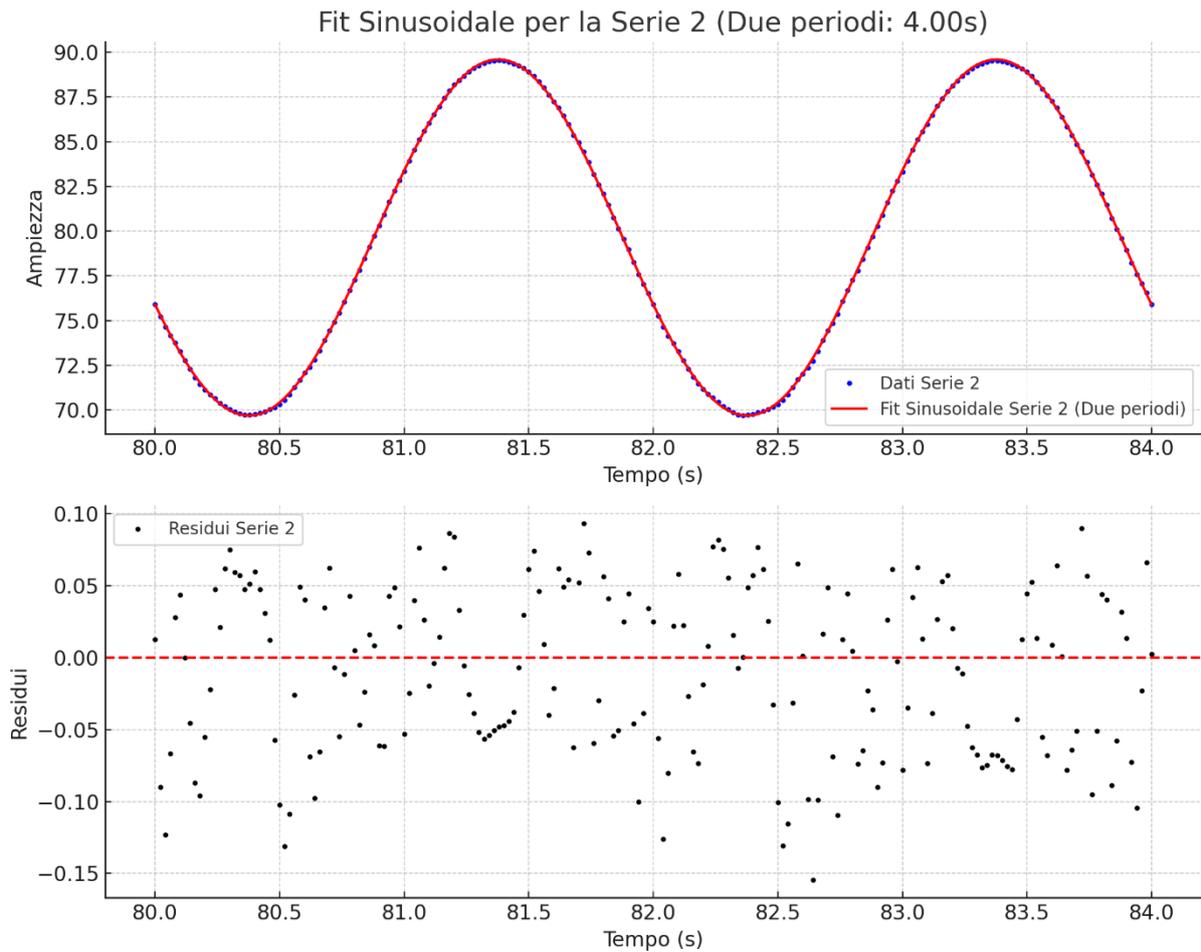


Figura 14: Relazione tra la sinusoide iniziale e la curva finale (con $T=4$ sec)

Tabella 2: Dati acquisiti tramite le onde sinusoidali

T dell'onda sinusoidale (sec)	Media residuals (mm)	Valore Residual Massimo (mm)
4	0,05433	0,15296
8	0,04842	0,15446

Come si può notare dalla **Tabella 2**, pur con periodi T diversi (e quindi di conseguenza anche con velocità di movimento differente), le differenze tra le onde sinusoidali e i movimenti del fantoccio sono estremamente piccole (0,05000 mm circa in entrambi i casi). Anche i picchi di valore massimo sono molto bassi.

3. Acquisizione e Simulazione di un segnale reale

Dopo aver valutato il comportamento del fantoccio nella prima parte di studio siamo passati ad un segnale reale. Questo segnale è stato registrato su un paziente sano (me stesso). L'obiettivo di questa seconda parte di studio è quello di verificare se il fantoccio dinamico, in queste diverse condizioni, riesce a simulare correttamente il respiro di un paziente reale e a replicare, quindi, segnali biologici.

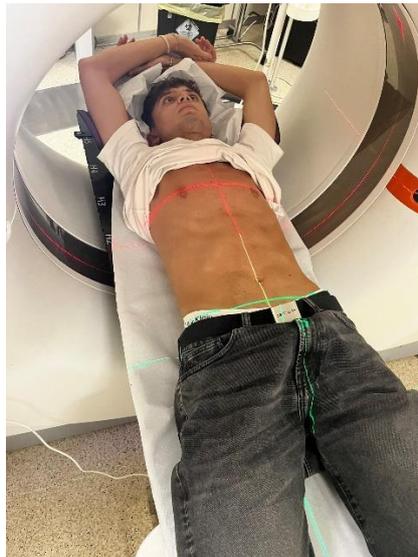


Figura 15: *Acquisizione respiro su un paziente reale*

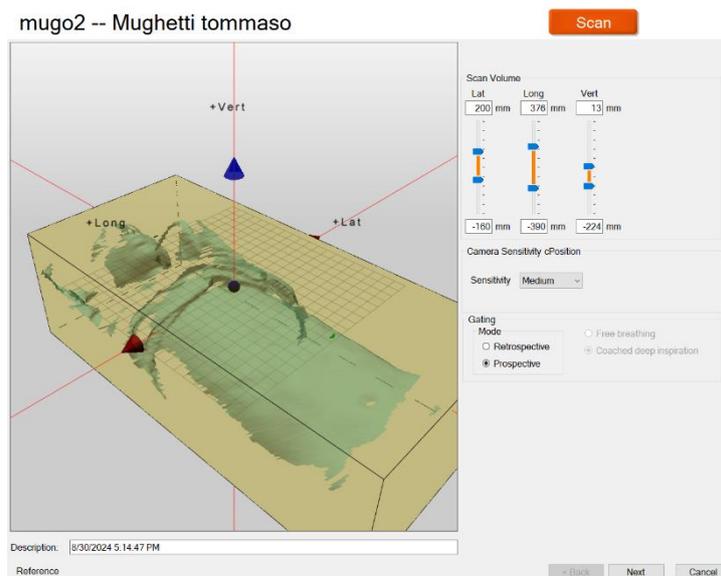


Figura 16: *Interfaccia software Sentinel con superficie del paziente*

Durante l'acquisizione del respiro è stato chiesto al paziente di effettuare tre fasi di respirazione diverse: una fase di respiro in condizioni standard, una fase di apnea inspiratoria e una fase di respiro in iperventilazione. Tutto ciò è stato utile per verificare che, in condizioni respiratorie diverse, il fantoccio simulasse correttamente il respiro. Anche in questa seconda fase la curva registrata dal sistema Sentinel è stata inserita nel software di gestione del fantoccio e successivamente è stato acquisito, sempre tramite Sentinel, il movimento del fantoccio. Infine, abbiamo messo in relazione le due curve risultanti.

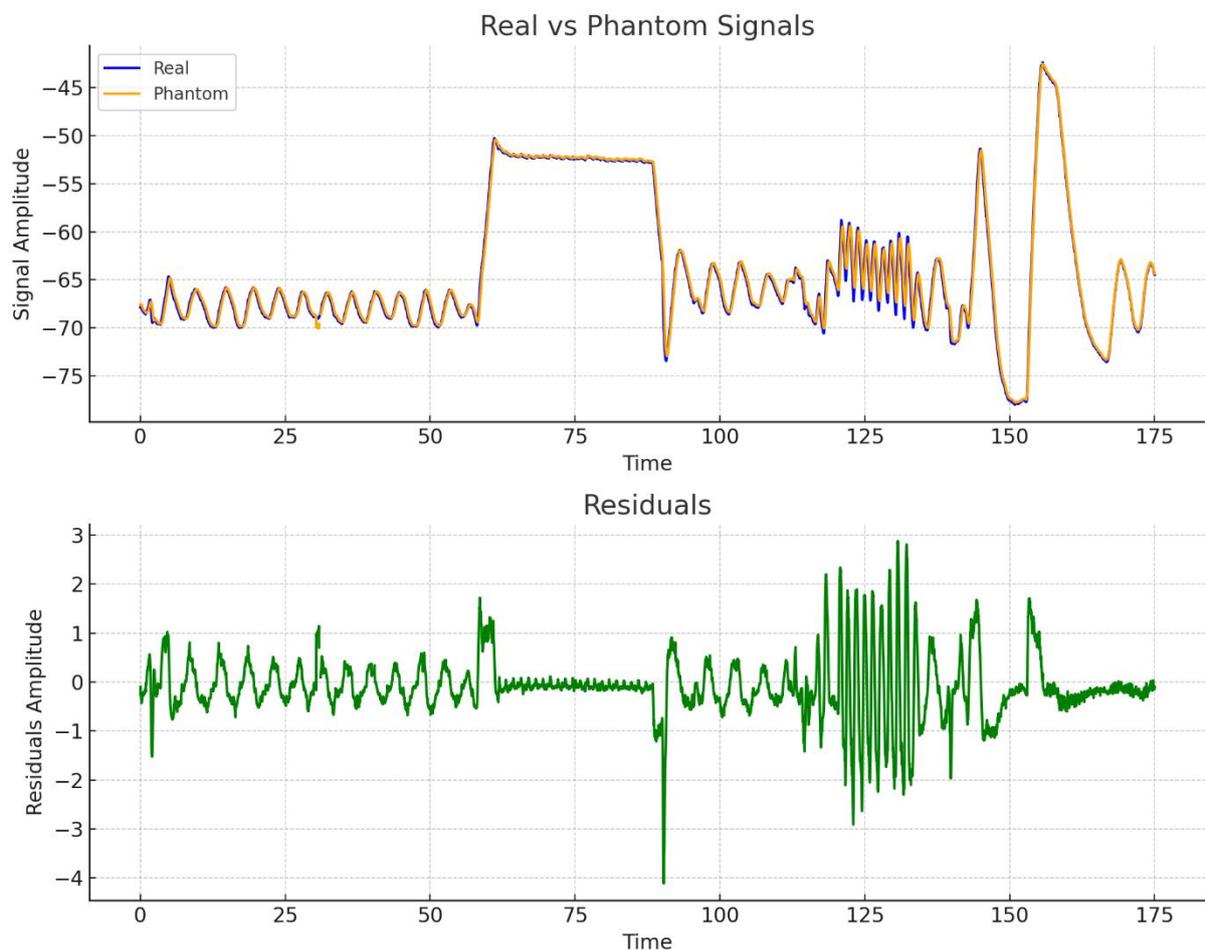


Figura 17: Grafico paziente reale⁸

⁸ Il grafico superiore rappresenta, con due colori differenti, due curve: la curva blu rappresenta la respirazione del paziente reale mentre la curva arancione rappresenta il movimento del fantoccio. Entrambi i movimenti sono stati registrati tramite sistema SGRT Sentinel. Il grafico inferiore rappresenta la differenza tra le due curve soprastanti. Nell'asse x è raffigurato il tempo in secondi (s), mentre nell'asse y è raffigurata l'ampiezza (nel grafico superiore l'ampiezza del segnale rispetto all'isocentro, mentre nel grafico inferiore l'ampiezza della differenza di segnale tra le due curve in mm).

Tabella 3: Dati acquisiti sul paziente reale

Fase Respiratoria	Intervallo Temporale (sec)	Media (mm)⁹	Valore Residual Massimo (mm)
Respirazione fisiologica	0 – 58,20	0,303	1,524
Inspirazione profonda	58,22 – 61,06	1,012	1,719
Apnea inspiratoria	61,08 – 88,40	0,099	0,574
Espirazione	88,42 – 90,84	1,307	4,112
Respirazione fisiologica	90,86 – 112,80	0,331	0,913
Iperventilazione	112,82 - 134,82	1,081	2,910

Come si può notare nella **Tabella 3**, a seconda dei diversi tipi di respirazione, il fantoccio si è comportato in modo differente. Durante la respirazione fisiologica (0 - 58,2 sec) la differenza tra le due curve rimane costante con una media di 0,303 mm. Successivamente è stato chiesto al paziente di effettuare un'inspirazione e di trattenere l'aria, entrando in apnea inspiratoria. In un primo momento (58,22 sec - 61,06 sec), nel quale il paziente ha effettuato l'inspirazione profonda, c'è stato un incremento dell'errore del fantoccio dovuto probabilmente alla brusca variazione del respiro. In seguito, durante l'apnea (61,08 sec - 88,4 sec), i movimenti limitati del paziente hanno limitato l'errore del fantoccio, garantendo una differenza media molto bassa (0,099 mm). Un altro momento in cui il fantoccio non è riuscito a seguire in maniera impeccabile il respiro del paziente è stato nel momento in cui quest'ultimo ha effettuato l'espiazione per tornare a respirare normalmente. Infatti, i dati ci riferiscono un

⁹ Ogni punto della curva riguardante il respiro del paziente reale è messo in relazione con lo stesso punto preso però nella curva riguardante il movimento del fantoccio. Quindi avremo per ogni punto temporale una differenza di segnale. Per ogni fase respiratoria è stata fatta la media aritmetica di tutte queste differenze di segnale.

picco di differenza di 4,112 mm, picco più alto registrato durante lo studio. Il successivo tratto di respirazione fisiologica è quasi identico a quella precedente con una media di 0,331 mm. Infine, è stato chiesto al paziente di effettuare una fase di respirazione in iperventilazione volontaria. In questa fase, concordemente con ciò che abbiamo visualizzato in precedenza, l'errore è più alto (media di 1,081 mm).

4. Conclusioni

Il sistema SGRT è un dispositivo integrato essenziale nella moderna radioterapia a fasci esterni (EBRT - External Beam Radiation Therapy). Ogni soluzione commerciale di SGRT si basa su una combinazione complessa di componenti hardware e software. Inoltre, la tecnica SGRT è fortemente dipendente dalle caratteristiche del paziente. Di conseguenza, l'uso efficace di questa tecnologia richiede la presenza di professionisti adeguatamente formati e addestrati. Il TSRM è la figura professionale più indicata per gestire l'apparecchiatura e la necessaria personalizzazione del trattamento per ogni paziente. Non basta, infatti, la formazione fornita dal fabbricante; è necessaria un'esperienza approfondita, sia tecnica che umana, per affrontare con perizia le diverse situazioni che questo sistema può presentare. Ogni paziente è unico e, di conseguenza, ogni trattamento deve essere adattato alle sue esigenze specifiche.

Il fantoccio dinamico utilizzato nei nostri studi rappresenta uno strumento di controllo indipendente dal sistema SGRT e offre una modalità utile per simulare il movimento respiratorio del paziente, consentendo di condurre studi accurati con l'ausilio di SGRT. Attraverso la simulazione di forme d'onda standard sul fantoccio dinamico, abbiamo dimostrato la capacità del sistema di replicare movimenti di superficie con un andamento sinusoidale. L'errore medio di queste simulazioni è inferiore a 0,1 mm (in molti casi anche inferiore a 0,05 mm), ben entro le tolleranze previste per il controllo delle superfici e della respirazione.

I sistemi SGRT Sentinel e CIRS Dynamic Phantom sono in grado di scambiarsi file mediante un codice di conversione, consentendo la simulazione meccanica del respiro del paziente. Il fantoccio dinamico è riuscito a replicare atti respiratori normali con un errore medio inferiore a 0,5 mm e un errore massimo di circa 1,5 mm, con quest'ultimo associato ai gradienti di variazione del respiro. In situazioni più impegnative, come durante inspirazioni ed espirazioni profonde o durante iperventilazione, l'errore medio diventa circa tre volte maggiore rispetto a quello di una respirazione fisiologica, con picchi fino a 4 mm. Tuttavia, nel

caso del "breath hold" (apnea inspiratoria), i risultati sono stati molto positivi, con un errore medio inferiore a 0,1 mm.

Questi risultati indicano che il fantoccio dinamico può essere utilmente impiegato per simulare la condizione di erogazione dei piani di trattamento radioterapici in "breath hold". Tuttavia, il fantoccio mostra difficoltà nel seguire movimenti respiratori ad alte frequenze. Poiché il segnale di trigger respiratorio ha una natura impulsiva e alta frequenza, sarà necessario effettuare ulteriori approfondimenti sull'errore temporale associato all'uso del fantoccio come sorgente di simulazione per atti respiratori utilizzati come trigger nell'erogazione della terapia.

Bibliografia e sitografia:

1. Align Advance
<https://www.temasinerjie.it/product/alignrt-advance/>
2. VisionRT, Getting Started With SGRT
<https://www.visionrt.com/technology/sgrt/>
3. Surface-guided radiation therapy Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-guided_radiation_therapy
4. Li G. Advances and potential of optical surface imaging in radiotherapy. *Phys Med Biol.* 2022 Aug 9;67(16):10.1088/1361-6560/ac838f. doi: 10.1088/1361-6560/ac838f. PMID: 35868290; PMCID: PMC10958463.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10958463/>
5. CIRS Motion Control User Guide
https://www.cirsinc.com/wp-content/uploads/2023/03/CIRS_Motion_Control_User_Guide.pdf
6. Mast M, Perryck S. Introduction to: Surface Guided Radiotherapy (SGRT). *Tech Innov Patient Support Radiat Oncol.* 2022 Apr 15;22:37-38. doi: 10.1016/j.tipsro.2022.04.004. PMID: 35464887; PMCID: PMC9027274.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9027274/>
7. Beer KT. Introduction of SGRT in clinical practice. *Tech Innov Patient Support Radiat Oncol.* 2022 Feb 2;21:27-30. doi: 10.1016/j.tipsro.2022.01.003. PMID: 35392417; PMCID: PMC8981985.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8981985/>
8. Psarras M, Stasinou D, Stroubinis T, Protopapa M, Zygogianni A, Kouloulis V, Platoni K. Surface-Guided Radiotherapy: Can We Move on from the Era of Three-Point Markers to the New Era of Thousands of Points? *Bioengineering (Basel).* 2023 Oct 16;10(10):1202. doi: 10.3390/bioengineering10101202. PMID: 37892932; PMCID: PMC10604452.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10604452/>

9. Freislederer P, Kügele M, Öllers M, Swinnen A, Sauer TO, Bert C, Giantsoudi D, Corradini S, Batista V. Recent advanced in Surface Guided Radiation Therapy. *Radiat Oncol.* 2020 Jul 31;15(1):187. doi: 10.1186/s13014-020-01629-w. Erratum in: *Radiat Oncol.* 2020 Oct 24;15(1):244. doi: 10.1186/s13014-020-01661-w. PMID: 32736570; PMCID: PMC7393906.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7393906/>
10. Dynamic Phantoms User Guide Sun Nuclear
https://www.cirsinc.com/wp-content/uploads/2023/12/Model_008A_Dynamic_Phantoms_User_Guide.pdf
11. Al-Hallaq HA, Cerviño L, Gutierrez AN, Havnen-Smith A, Higgins SA, Kügele M, Padilla L, Pawlicki T, Remmes N, Smith K, Tang X, Tomé WA. AAPM task group report 302: Surface-guided radiotherapy. *Med Phys.* 2022 Apr;49(4):e82-e112. doi: 10.1002/mp.15532. Epub 2022 Mar 15. PMID: 35179229; PMCID: PMC9314008.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9314008/>
12. Catalyst+ HD™ Posizionamento, monitoraggio e gating respiratorio
<https://tecnosan.it/prodotti/radioterapia/sgrt-e-gating-respiratorio/catalyst-hd/>
13. IDENTIFY, Picture the future of SGRT
<https://www.varian.com/products/radiotherapy/real-time-tracking-motion-management/identify>
14. Motion Management QA Phantoms CIRS Sun Nuclear
<https://www.sunnuclear.com/products/motion-management-phantoms>