



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "FORO ITALICO"

*Ph.D. in Human Movement and Sport Science*

*XXXVIII Cycle*

**Neuromuscular Mechanisms underlying  
Motor Coordination in Young and Older Adults  
during Dynamic Balance Control**

**Candidate:** Imma Ceriello

## **ABSTRACT**

Dynamic balance control relies on the integration of multisensory inputs, coordinated neuromuscular activation, and whole-body biomechanical organization. Everyday tasks such as upright reaching or rising from a chair challenge these processes by requiring controlled shifts of the center of mass while maintaining postural stability. While it is established that aging diminishes sensory reliability, slows neuromuscular responses, and alters movement strategies, the exact ways these changes affect balance regulation are still not fully understood. Traditional clinical assessments are limited in their ability to capture the underlying neural and modular structure of movement. Therefore, this thesis investigates neuromuscular and kinematic mechanisms that shape balance control across different tasks and age groups.

To address this gap, a series of studies were conducted to examine the structure of muscle synergies, neural coupling via intermuscular coherence, and joint kinematic coordination during functional movements. These complementary investigations shed light on how the central nervous system (CNS) simplifies motor control through modular organization, how neural signals are distributed among muscles, and how the mechanical degrees of freedom of the body are coordinated to perform voluntary destabilizing tasks.

In the first study, muscle synergies underlying multidirectional upright reaching in young adults were assessed. The results revealed direction-dependent yet robust synergies, suggesting that the CNS relies on a stable modular repertoire while flexibly modulating its recruitment depending on task demands.

The second study investigated neural synchronization among trunk and lower-limb muscles during the same multidirectional upright reaching tasks. Coherence patterns varied according to reach direction, revealing direction-dependent adjustments in shared neural inputs and indicating that muscle coordination reflects not only mechanical demands but also centrally driven control strategies.

In the third study, bilateral muscle synergies during a rising-from-a-chair task were analyzed to characterize their relationship with the body center of mass dynamics. Mapping synergy activation to center of mass position revealed functionally interpretable patterns that were independent of movement timing or limb dominance.

The fourth study extended this analysis to older adults performing the same task. Although the spatial composition of synergies remained preserved, aging significantly affected their temporal structure, producing earlier and broader activations. These alterations were accompanied by changes in center-of-mass-synergy associations, suggesting a shift toward more global and less efficient control strategies. The fifth study evaluated the effects of aging on synergy organization during multidirectional upright reaching. Older adults showed fewer synergies in tasks with greater mediolateral demands and broader activation profiles, suggesting compensatory strategies to maintain stability.

Finally, the sixth study examined kinematic synergies during multidirectional upright reaching in young adults, identifying consistent coordination patterns across directions that reflect the mechanical principles of whole-body balance regulation.

Collectively, the findings show that while the fundamental structure of motor modules is largely preserved across tasks and age groups, the CNS modulates their recruitment, timing, and neural coupling depending on directional demands, postural complexity, and age-related constraints. Older adults exhibit increased coactivation, reduced modular dimensionality under mediolateral challenges, and temporal broadening of module activity, suggesting a shift from flexible, task-specific control to more generalized and conservative strategies. These results provide new insight into the organization, adaptability, and deterioration of balance-related neuromuscular coordination and suggest potential biomarkers and targets for personalized rehabilitation aimed at restoring efficient postural control.

## **ABSTRACT (in italiano)**

Il controllo dinamico dell'equilibrio dipende dall'integrazione di informazioni multisensoriali, dall'attivazione neuromuscolare coordinata e da un'organizzazione biomeccanica armonica dell'intero corpo. Movimenti quotidiani come il reaching da stazione eretta o l'alzarsi da una sedia mettono alla prova questi meccanismi, richiedendo spostamenti controllati del centro di massa mantenendo al tempo stesso stabilità posturale. Nonostante sia noto che l'invecchiamento comprometta l'affidabilità sensoriale, rallenti la risposta neuromotoria e modifichi le strategie di movimento, l'impatto preciso di tali cambiamenti sui meccanismi di controllo dell'equilibrio rimane non completamente esplorato. Inoltre, gli strumenti clinici tradizionali non permettono di cogliere le strutture neurali e modulari che sottendono il movimento. Da qui nasce l'obiettivo di questa tesi: analizzare i meccanismi neuromuscolari e cinematici che caratterizzano l'equilibrio dinamico in giovani e anziani durante compiti funzionali specifici della vita quotidiana.

A tal fine, sono stati condotti sei studi che combinano l'analisi delle sinergie muscolari, la coerenza intermuscolare e la decomposizione delle sinergie cinematiche. Questo approccio integrato permette di comprendere come il sistema nervoso centrale (SNC) organizzi il movimento in moduli funzionali, come i comandi neurali siano distribuiti tra gruppi muscolari e come i vari gradi di libertà del corpo vengano coordinati durante compiti che richiedono volontariamente una destabilizzazione controllata.

Nel primo studio sono state analizzate le sinergie muscolari coinvolte in compiti di reaching multidirezionale in stazione eretta nei giovani adulti. È emerso un insieme di sinergie stabile, sul quale il SNC interviene modulando l'attivazione in base alla direzione del movimento, a conferma di un repertorio modulare coerente ma flessibile.

Il secondo studio ha invece esaminato la sincronizzazione neurale tra i muscoli del tronco e degli arti inferiori negli stessi soggetti e compiti. I pattern di coerenza variavano in funzione della direzione, evidenziando aggiustamenti negli input neurali condivisi e indicando che il coordinamento muscolare non risponde soltanto alle richieste meccaniche, ma riflette anche strategie di controllo di origine centrale.

Il terzo studio ha analizzato le sinergie muscolari bilaterali durante il compito di alzarsi da una sedia, con l'obiettivo di comprenderne la relazione con la dinamica del centro di massa. L'associazione tra attivazione delle sinergie muscolari e posizione del centro di massa ha rivelato pattern funzionali chiari e interpretabili, indipendenti dal tempo di esecuzione o dalla dominanza degli arti.

Il quarto studio ha esteso lo stesso approccio agli adulti anziani. Sebbene la struttura spaziale delle sinergie risultasse sostanzialmente conservata rispetto ai giovani, l'invecchiamento ha inciso in modo marcato sulla componente temporale, con attivazioni più anticipate e prolungate. Questi cambiamenti erano associati a differenti relazioni tra sinergie e centro di massa, suggerendo strategie di controllo più globali e meno efficienti rispetto ai giovani.

Il quinto studio ha valutato l'effetto dell'età sull'organizzazione delle sinergie durante compiti di reaching multidirezionale. Negli anziani è emerso un numero inferiore di sinergie nei compiti che richiedono un maggiore controllo medio-laterale, insieme a profili di attivazione più ampi. Tali modifiche sembrano riflettere strategie compensative adottate per mantenere la stabilità in condizioni posturali più impegnative.

Il sesto studio ha infine esaminato le sinergie cinematiche nei giovani adulti durante gli stessi compiti di reaching multidirezionale, identificando pattern di coordinazione coerenti tra le diverse direzioni, in linea con i principi biomeccanici che regolano l'organizzazione del movimento e il controllo dell'equilibrio.

Complessivamente, il lavoro mostra che, sebbene la struttura spaziale dei moduli motori sia ampiamente preservata nel corso dell'invecchiamento, è il loro reclutamento temporale, insieme alla distribuzione dei comandi neurali, a modificarsi in relazione alla complessità posturale e alle richieste direzionali, con effetti misurabili sulla cinematica, sulla stabilità e sull'efficacia del movimento. Con l'avanzare dell'età, questi cambiamenti suggeriscono una transizione verso strategie più conservative e meno flessibili. I risultati offrono una comprensione più profonda dell'organizzazione neuromeccanica dell'equilibrio dinamico e indicano potenziali biomarcatori e obiettivi per interventi riabilitativi mirati a preservare o recuperare un controllo posturale efficace.