

**The influence of specific cognitive-motor training in virtual reality on the executive functions of competitive athletes and identification of the related neural bases**

Ph.D. program

*“Scienze del Movimento Umano e dello Sport”*

*“Neuroscienze Cognitive e dell’Azione”*

XXXVIII° Cycle

Andrea Casella

Academic Years

2022 - 2025

## **Abstract**

This doctoral thesis investigates the effects of cognitive-motor dual-task (CMDT) training implemented in virtual reality (VR) on anticipatory and decision-making cognitive functions and related electrophysiological correlates in professional and semi-professional athletes in open-skill sports. This is because these sports require the simultaneous management of perceptual, cognitive, and motor processes in dynamic and unpredictable environments. Despite this, traditional training methodologies continue to favour technical and physical aspects, neglecting the systematic training of cognitive functions. The main objective of this thesis was therefore to analyse the influence of specific CMDT-VR training on the physical and cognitive performance of athletes. Through five complementary studies, this dissertation progressively analysed the cognitive-motor plasticity induced by different CMDT-VR protocols, using behavioural and neurophysiological measures. Specifically, the first study, conducted on young adults, aimed to validate a CMDT training paradigm in VR. This protocol, centred on visuomotor readiness and perceptual discrimination exercises, produced effects at both the behavioural and electrophysiological (EEG) levels. Participants exhibited faster response times and higher response accuracy, accompanied by increased amplitudes of the anticipatory pN and BP. The second study, conducted on semi-elite young soccer players, confirmed and expanded upon these results. Integrating a sport-specific CMDT protocol within the regular training routine led to significant improvements in response speed and response accuracy, paralleled by enhanced activity in the prefrontal and premotor anticipatory event-related potentials (ERP) components derived from EEG. This evidence suggests a potentiation of top-down cognitive control and motor preparation, both of which are fundamental to anticipatory and action-planning mechanisms. The third study broadened the analysis to include post-stimulus ERP components, revealing increased amplitudes in early and late components. Then, considering the limited literature on the neural correlates of dance expertise, I conducted a fourth study aimed at identifying the cognitive functions that characterize professional dancers compared to athletes from other disciplines. Results revealed a pronounced enhancement of the anticipatory brain activity accompanied by a reduction in reactive activity during a cognitive task. On these findings, a fifth and final study was conducted to examine the effects of a specific CMDT-

VR training protocol on both the cognitive performance and motor skills of professional dancers. The results showed significant improvements in response accuracy and postural stability. These behavioural enhancements were accompanied by increased anticipatory prefrontal activity. Conversely, motor preparation and response times were not significantly modified by the training. From an applied perspective, the findings of this doctoral research highlight the potential of virtual reality as a strategic complement to conventional sports training, effectively integrating the cognitive dimension into technical and tactical practice. The implementation of CMDT protocols in VR enables athletes to train executive and anticipatory functions within an immersive, safe, and fully controllable environment, engaging in decision-making, attentional, and anticipatory challenges closely resembling real-game demands, yet with the advantage of high reproducibility, intensive repetition, and immediate feedback.

## **Abstract**

La presente tesi di dottorato indaga gli effetti di protocolli di allenamento cognitivo-motorio in dual-task (Cognitive-Motor Dual-Task, CMDT) implementati in realtà virtuale (VR) sulle funzioni cognitive anticipatorie e decisionali, nonché sui relativi correlati elettrofisiologici, in atleti professionisti e semi-professionisti impegnati in sport open-skill. Tali discipline richiedono infatti la gestione simultanea di processi percettivi, cognitivi e motori all'interno di contesti dinamici e imprevedibili. Nonostante ciò, le metodologie di allenamento tradizionali continuano a privilegiare prevalentemente gli aspetti tecnici e fisici della prestazione, trascurando l'allenamento sistematico delle funzioni cognitive.

L'obiettivo principale di questa tesi è stato pertanto quello di analizzare l'influenza di specifici protocolli CMDT-VR sulla performance fisica e cognitiva degli atleti. Attraverso cinque studi complementari, il lavoro di ricerca ha progressivamente esaminato la plasticità cognitivo-motoria indotta da differenti protocolli CMDT-VR, avvalendosi di misure comportamentali ed elettrofisiologiche.

In particolare, il primo studio, condotto su giovani adulti, ha avuto lo scopo di validare un paradigma di allenamento CMDT in realtà virtuale. Il protocollo, incentrato su esercizi di prontezza visuomotoria e discriminazione percettiva, ha prodotto effetti significativi sia a livello comportamentale sia elettrofisiologico (EEG). I partecipanti hanno mostrato tempi di risposta più rapidi e una maggiore accuratezza, accompagnati da un incremento dell'ampiezza delle componenti anticipatorie pN e BP.

Il secondo studio, condotto su giovani calciatori semi-élite, ha confermato e ampliato tali risultati. L'integrazione di un protocollo CMDT sport-specifico all'interno dell'allenamento abituale ha determinato miglioramenti significativi nella velocità e accuratezza di risposta, associati a un potenziamento dell'attività anticipatoria a livello prefrontale e premotorio, come evidenziato dalle componenti ERP derivate dall'EEG. Queste evidenze suggeriscono una facilitazione dei meccanismi di controllo cognitivo top-down e di preparazione motoria, entrambi fondamentali per i processi di anticipazione e pianificazione dell'azione.

Il terzo studio ha esteso l'analisi includendo le componenti ERP post-stimolo, rivelando un incremento dell'ampiezza sia delle componenti precoci sia di quelle tardive. Successivamente,

considerando la limitata letteratura sui correlati neurali dell'expertise nella danza, è stato condotto un quarto studio volto a identificare le funzioni cognitive che caratterizzano i danzatori professionisti rispetto ad atleti di altre discipline. I risultati hanno evidenziato un marcato potenziamento dell'attività cerebrale anticipatoria, accompagnato da una riduzione dell'attività reattiva durante l'esecuzione di un compito cognitivo.

Sulla base di tali evidenze, un quinto e ultimo studio ha esaminato gli effetti di un protocollo CMDT-VR specificamente progettato per i danzatori professionisti, valutandone l'impatto sia sulla performance cognitiva sia sulle abilità motorie. I risultati hanno mostrato miglioramenti significativi nell'accuratezza di risposta e nella stabilità posturale, associati a un incremento dell'attività anticipatoria prefrontale. Al contrario, la preparazione motoria e i tempi di risposta non hanno mostrato modifiche significative in seguito all'allenamento.

Da un punto di vista applicativo, i risultati di questo lavoro di tesi evidenziano il potenziale della realtà virtuale come complemento strategico all'allenamento sportivo tradizionale, consentendo un'integrazione efficace della dimensione cognitiva all'interno della pratica tecnica e tattica. L'implementazione di protocolli CMDT in VR permette agli atleti di allenare le funzioni esecutive e anticipatorie in un ambiente immersivo, sicuro e completamente controllabile, affrontando sfide decisionali, attentive e anticipatorie altamente rappresentative delle richieste di gara reale, ma con il vantaggio di un'elevata riproducibilità, di una ripetizione intensiva e di un feedback immediato.

