Journal of
Sport Biomechanics

Spring 2023. Vol 9. Issue 1

Review Paper

Sensors Technology in Sports Biomechanics: Exploring Applications and Advancements

***Mojtaba Khadempir[1], Hassan Daneshmandi[2], Roya Bigtashkhani[3], Hosein Mohammad Alizadehfard[4], Mohammadreza Saghafi[3]**

1. Department of Sports Pathology and Corrective Movements, Faculty of Physical Education and Sports Sciences, University of Imam Reza, Mashhad, Iran.
2. Department of Physical Education and Sports Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
3. Department of Sports Pathology and Corrective Movements, Faculty of Physical Education and Sports Sciences, University of Tehran, Iran.
4. Department of Chinese and Complementary Medicine, School of Persian and Complementary Medicine, University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Khadempir M, Daneshmandi H, Bigtashkhani R, Mohammad Alizadehfard H, Saghafi M. Sensors Technology in Sports Biomechanics: Exploring Applications and Advancements (Persian)]. Journal of Sport Biomechanics. 2022; 9 (1) :74-89. https://doi.org/10.21859/JSportBiomech.9.1.369.1

https://doi.org/10.21859/JSportBiomech.9.1.369.1

CC BY NC

Article Info:

Received: 26 April 2023
Accepted: 11 June 2023
Available Online: 20 June 2023

Keywords:

Sports technology; Athletes; Biomechanic; Inertial sensors; Electromyography

ABSTRACT

Objective Wearable sensors offer non-invasive, portable, and generally convenient ways to monitor sports training. This systematic review aims to present current evidence on using wearable sensors in sports for athletes.

Methods Articles published in English before May 2020 were searched in Scopus, Web of Science, PubMed, and EBSCO databases. Titles, abstracts, and keywords were probed with a search string including terms related to wearable sensors and sports. In addition to providing insight into how performance is achieved, these sensors also provide detailed kinematic, kinetic, and electromyographic information. Wearable sensors such as inertial sensors and electromyography are the most suitable from this point of view.

Results Advances have been dramatic as sensors have become smaller, more precise, and capable of measuring more accurate data. Force plates measure the ground reaction forces that an athlete exerts while running, jumping, or landing. This information is critical in preventing injuries and understanding how different movement patterns affect performance. Strength platforms can also assess balance and stability, helping to develop injury prevention protocols and rehabilitation programs.

Conclusion Reviewing the literature, inertial sensors are the most commonly used to evaluate athletes' performance. However, electromyography may also be used. Even though a wide range of sports was examined in the studies, running was the dominant sport evaluated. Therefore, researchers, athletes, and coaches find it helpful to understand current sports performance assessment technologies.

*** *Corresponding Author:***
Mojtaba Khadempir
Address: Department of Sports Pathology and Corrective Movements, Faculty of Physical Education and Sports Sciences, University of Imam Reza, Mashhad, Iran.
Tel: +98 (915) 1803449
E-mail: mojtaba.khadempir@gmail.com

Extended Abstract

1. Introduction

As technology advances and becomes more accessible to the general public, it becomes easier to implement biomechanical technology in sports. Biomechanical technology has many current and potential points of application that benefit injury prevention, technique improvement, rule enforcement, performance optimization, overall health and condition analysis, exercise timing, and product development and testing. The extent to which a given injury of a specific severity affects an athlete's ability to perform a sport-related task is a question that needs to be addressed through large-scale studies, and wearable systems provide a practical solution to achieve this goal. Additionally, the wide variety of disorders among athletes also influences the design of sports equipment. In modern competitive sports, equipment plays a central role, as technological advancements in manufacturing have provided tools and materials to enhance ergonomics and performance. Previous reviews of wearable technology applications in sports did not specifically focus on athletes and provided more general insights. However, the literature highlights the benefits and potential of wearable sensors to support athletes at all sports levels and in various application fields. Therefore, this review aims to provide information to future researchers, athletes, and coaches to promote evidence-based practice by exploring the literature on using wearable sensors in sports for individuals.

2. Methods

A systematic search was conducted in the Scopus, Web of Science, EBSCO, and PubMed databases until May 2020. Wearable sensors encompass accelerometers, gyroscopes, IMUs, electromyography, as well as devices for measuring heart rate and oxygen consumption. In the sports category, sports activities are classified, including the 28 Paralympic sports approved by the International Paralympic Committee (IPC, https://www.paralympic.org/sports - accessed in 2020), along with others – various types of sports that individuals can engage in.

Inertial sensors and electromyography stood out as the most frequently utilized wearable sensors, despite the presence of other sensor types such as GPS, digital goniometers, and heart rate monitors. They are preferred for their ability to measure biomechanical and physiological performance in a more natural environment. To leverage the strengths of the measurement system, EMG and inertial sensors are often combined with motion capture and video analysis, allowing for the simultaneous measurement of muscle activity, body and equipment movement, and joint kinematics. All examined articles featured the use of flexible wearable devices to monitor athletes' physiological and biochemical statuses.

3. Results

Over the past decade, inertial sensors and wearable sensor devices have gained increasing prevalence in sports. Through a simple search on Scopus using the keywords "sport" and "inertial sensors," 37 articles published from January to May 2020 were identified – a number identical to that found for the years 2004-2009 using the same search terms. Wearable sensors and smart equipment incorporate low-power miniature inertial sensors. Presently, micro-electromechanical systems (MEMS) are primarily employed as inertial sensors due to their portability, small size, light weight, affordability, and low power consumption. These sensors typically comprise an accelerometer, gyroscope, and magnetometer. Inertial sensors are employed to measure the athlete's body in static and dynamic modes, encompassing parameters such as location, orientation, posture, and angles between body parts in a stationary state. In a dynamic state, parameters like displacement, trajectory, velocity, linear acceleration, shocks (changes in acceleration), angular velocity, and acceleration may also be necessary. While all kinematic parameters must be deduced from one or more measurements, linear acceleration (measured by the accelerometer), angular momentum (measured by the gyroscope), and orientation (measured by the magnetometer) can all be directly measured. For instance, to calculate an object's speed, its acceleration over time is integrated, and to estimate its rotation angle, its angular velocity is integrated. MEMS sensors can exhibit inaccuracies that impact both measured and derived results.

4. Conclusion

An athlete can be quantitatively evaluated in their environment using wearable sensors. Most of the evidence supporting the use of wearable sensors in sports is related to performance evaluation. Inertial and electromyography sensors measure upper-body muscle activity as well as linear and rotational acceleration. Further development could be directed towards sport-specific individual applications, such as athlete classification and injury prevention, despite the limited scientific literature on these topics. Defining biomechanical and physiological parameters related to sports performance specific to a certain sport is essential when dealing with athlete classification, preventing future injuries, and investigating their relationship with functional limitations associated with the type and severity of disability.
In addition to reflecting classical aspects of sports biomechanics in non-disabled athletes, wearable applications in performance characterization for training optimization have also investigated how disability affects sports performance in disabled athletes. Although this field of application is still developing, it is of particular interest to coaches, trainers, and athletes, as it provides valuable insights for all the areas mentioned above. Furthermore, the literature demonstrates that wearable equipment is often indispensable for athletes.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

There were no ethical considerations to be considered in this research.

Funding

This research did not receive any grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

Authors' contributions

All authors equally contributed to preparing article.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله مروری

فناوری حسگرها در بیومکانیک ورزشی: کاوش در کاربردها و پیشرفت‌ها

*مجتبی خادم پیر[۱]، حسن دانشمندی[۲]، رؤیا بیگتاشخانی[۳]، حسین محمد علیزاده فرد[۴]، محمدرضا ثقفی[۳]

۱. گروه آسیب‌شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشگاه بین‌المللی امام رضا، مشهد، ایران.

۲. گروه آسیب‌شناسی ورزشی و حرکت اصلاحی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۳. گروه آسیب‌شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴. گروه طب چینی و مکمل، دانشکده طب فارسی و تکمیلی، دانشگاه علوم پزشکی، مشهد، ایران.

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۶ اردیبهشت ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ۲۱ خرداد ۱۴۰۲
تاریخ انتشار: ۳۰ خرداد ۱۴۰۲

چکیده

هدف حسگرهای پوشیدنی راههای غیرتهاجمی، قابلحمل و در مجموع راحت را برای نظارت بر تمرینات ورزشی ارائه میدهند. هدف این بررسی سیستماتیک ارائه شواهد فعلی در مورد استفاده از حسگرهای پوشیدنی در ورزش برای افراد ورزشکار است.

روش‌ها جستجوی مقالات منتشر شده به زبان انگلیسی قبل از می ۲۰۲۰ در پایگاههای دادههای Scopus، Web-Of-Science، PubMed و EBSCO، جستجوی عناوین، چکیدهها و کلمات کلیدی با یک رشته جستجو شامل عبارات مربوط به حسگرهای پوشیدنی و ورزش انجام شد. این حسگرها علاوه بر ارائه بینشی در مورد نحوه دستیابی به عملکرد، اطلاعات دقیق سینماتیک، جنبشی و الکترومیوگرافی را نیز ارائه میدهند. سنسورهای پوشیدنی مانند سنسورهای اینرسی و الکترومیوگرافی از این منظر مناسبترین هستند.

یافته‌ها پیشرفت‌ها با کوچک‌تر و دقیق‌تر شدن سنسورها و توانایی اندازه‌گیری داده‌های دقیق‌تر چشمگیر بوده است. صفحات نیرو، نیروهای واکنش زمین را که توسط یک ورزشکار در حین دویدن، پریدن یا فرود آمدن اعمال می‌شود اندازه‌گیری می‌کنند. این اطلاعات در پیشگیری از آسیب‌ها و درک اینکه چگونه الگوهای حرکتی مختلف بر عملکرد تأثیر می‌گذارند، بسیار مهم است. پلتفرم‌های نیرو همچنین می‌توانند برای ارزیابی تعادل و ثبات، کمک به توسعه پروتکل‌های پیشگیری از آسیب و برنامه‌های توان‌بخشی استفاده شوند.

نتیجه‌گیری بررسی متون، حسگرهای اینرسی رایجترین حسگر مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد ورزشکاران به نظر میرسد. بااین‌حال، الکترومیوگرافی ممکن است استفاده شود. حتی طیف وسیعی از ورزشها در مطالعات مورد بررسی قرار گرفت، دویدن ورزش غالب ارزیابیشده بود. بنابراین محققان، ورزشکاران و مربیان درک فناوریهای فعلی برای ارزیابی عملکرد ورزشی مفید می‌دانند.

کلید واژه‌ها:
فناوری ورزشی، ورزشکاران، بیومکانیک، سنسورهای اینرسی، الکترومیوگرافی

*نویسنده مسئول:
مجتبی خادم پیر
آدرس: گروه آسیب‌شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشگاه بین‌المللی امام رضا، مشهد، ایران
تلفن: ۱۸۰۳۴۴۹ (۹۱۵) ۹۸+
ایمیل: mojtaba.khadempir@gmail.com

مقدمه

در چند سال گذشته، علاقه به ورزش برای افراد ورزشکار با سرعت چشمگیری افزایش یافته است (۱). به‌طور هم‌زمان، شرکت در ورزش توسط تعداد فزاینده‌ای از افراد مشاهده شده است، با شواهدی که نشان‌دهنده تأثیر مثبت ورزش بر کیفیت زندگی، سلامت جسمانی و رفاه روانی–اجتماعی در این جمعیت است (۱). پیشرفت‌های اخیر در فناوری، انواع جدیدی از تجهیزات را ایجاد کرده است که می‌توانند در بیومکانیک برای اندازه‌گیری حرکت و اینرسی در حین حرکت انسان مورد استفاده قرار گیرند. حوزه‌های کاربرد این فناوری‌ها چندین حوزه کلیدی بیومکانیک ورزشی از جمله افزایش عملکرد را در برمی‌گیرد. با افزایش در دسترس بودن، پتانسیل بیشتری برای استفاده نامناسب وجود دارد؛ بنابراین، آزمایش‌های مستقل گسترده برای اثبات اعتبار و قابلیت اطمینان این روش‌ها مورد نیاز است (۲). این مقاله به برخی از فناوری‌های جدید که به‌طور فزاینده‌ای در بیومکانیک ورزشی مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌پردازد و عوامل کلیدی را که باید در بهترین عمل در نظر گرفته شوند برجسته می‌کند. با توجه به تنوع زیاد ورزش‌ها و چگونگی تأثیر آن‌ها بر تمرینات ورزشی، پیشرفت در تحقیق و فناوری نقش کلیدی در ارائه ابزارهایی برای مشارکت ایمن، فراگیر و مؤثر در ورزش دارد. با توجه به پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر، تمرینات ورزشی و عملکرد مسابقات با استفاده از این دستگاه‌ها، به‌ویژه از منظر بیومکانیک ورزشی، پایش می‌شوند. بنابراین، افزایش سطح رقابت به پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر نسبت داده شده است. این رشته بیومکانیک ورزشی است که ارزیابی‌های کمی (و گاهی کیفی) عملکرد ورزشی، به‌ویژه سینماتیک و سینتیک حرکات ورزشی را ارائه می‌دهد (۳). توانایی اندازه‌گیری و توصیف حرکت انسان در طول فعالیت‌های ورزشی به بخشی جدایی‌ناپذیر از برنامه‌های مربیگری برای ارزیابی عملکرد ورزشکاران، بهبود تکنیک و پیشگیری از آسیب‌ها تبدیل شده است (۴). درواقع، تجزیه‌وتحلیل ویدئویی سه‌بعدی رفتار ورزشکار از طریق سیستم‌های الکترونیک نوری رایج‌ترین رویکرد برای تجزیه‌وتحلیل رفتار ورزشکاران در گذشته بود. باوجود این محدودیت‌ها، استفاده از روش‌های سه‌بعدی مبتنی بر نوری الکترونیکی در ورزش به‌دلیل مشکلات در تجزیه‌وتحلیل حرکت انسان در محیط‌های بیرونی، میزان زمان و مهارت‌های مورد نیاز برای حساس کردن سوژه‌ها و همچنین حجم محدود کالیبراسیون محدود است (۵). یک سیستم بدون نشانگر یا یک سیستم پردازش خاص، مانند OpenSim، برای غلبه بر محدودیت‌های ذاتی نشانگرهای بازتابی، یعنی تجزیه‌وتحلیل فضای داخلی و شایستگی‌های مورد نیاز، توسعه یافته است. الگوریتم‌های هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی هم‌زمان، به‌عنوان جایگزینی برای نشانگرهای بازتابنده توسعه یافته‌اند. در سال‌های اخیر، بیومکانیک ورزشی عمدتاً با استفاده از حسگرهای پوشیدنی انجام شده است که امکان جمع‌آوری داده‌های غیرتهاجمی را در طول اجرای حرکت فراهم می‌کند (۶). درنتیجه حسگرهای پوشیدنی، فعالیت‌های ورزشی را می‌توان در محیط‌های طبیعی آن‌ها انجام داد و محدودیت‌های اعمال شده توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی را دور زد، مانند سیستم اپتوالکترونیک ۳ بعدی، که هنوز یک استاندارد طلایی در تجزیه‌وتحلیل حرکت در نظر گرفته می‌شود. از جمله، حسگرهای اینرسی و کاوشگرهای الکترومیوگرافی به‌طور گسترده برای کمی‌سازی عینی سینماتیک، سینتیک و فعالیت عضلات در طول فعالیت‌های ورزشی استفاده می‌شوند. یکی از جهت‌های امیدوارکننده در استفاده از حسگرهای پوشیدنی، سیستم‌های بیوفیدبک آنلاین است که می‌تواند اطلاعات بازخورد تقویت شده هم‌زمان را به ورزشکاران و یا مربیان ارائه دهد.

اگرچه چندین بررسی سیستماتیک که قبلاً در ادبیات موجود است، قابلیت اطمینان، اعتبار و کاربرد حسگرهای اینرسی را برای کاربردهای ورزشی نشان می‌دهد، مروری بر کاربردهای خاص که می‌تواند با تجزیه‌وتحلیل سینماتیک، سینتیک، فعالیت عضلات و فیزیولوژیکی از طریق سنسورهای پوشیدنی قال اجرا باشد هنوز انجام نشده است. از این منظر، هدف ما ارائه یک مرور کلی در مورد کاربردهای بیومکانیک ورزشی در مورد حسگرهای پوشیدنی می‌باشد.

روش شناسی

مرور ادبیات با استفاده از پایگاه‌های داده Scopus، Web of Scienceو PubMed انجام شد. سنسورهای اینرسی و واحدهای الکترومیوگرافی به‌عنوان سه دسته قبل از بررسی ادبیات انتخاب شدند که برای کاربردهای ورزشی استفاده می‌شدند. در جولای ۲۰۲۰ بررسی ادبیات و در نوامبر ۲۰۲۰ پایان یافت. برای انجام جستجو از کلیدواژه‌های زیر استفاده شد: ورزش، حسگرهای پوشیدنی، دستگاه‌های پوشیدنی، بیومکانیک و بی‌سیم. علاوه بر این، کلمات کلیدی زیر در رابطه با حسگرهای اینرسی به جستجو اضافه شدند: سنسورهای اینرسی، سنسورهای حرکت، و سنسورهای اینرسی پوشیدنی. کلمات کلیدی اضافی نیز به جستجو اضافه شد. از جمله کلمات کلیدی مورد استفاده برای توصیف کاربردهای الکترومیوگرافی عبارت‌اند از: ماژول حرکتی، هماهنگی عضلانی، هم‌افزایی عضلانی، عضلات، الکترومیوگرافی، حرکتی اولیه، الگوهای فعال‌سازی و سازمان‌دهی مدولار. علاوه بر این، نمادهای عام، مانند خط فاصله یا کاماهای معکوس، به‌منظور جلوگیری از سوگیری در جستجوی ناشی از تغییرات در ریشه کلمات در نظر گرفته شدند.

جدول ۱. معیارهای ارزیابی کیفی اعتبار داخل (IV)، اعتبار آماری (SV) و اعتبار خارجی(EV)

ارزیابی	معیار	هدف
IV	شرح یک هدف مشخص و واضح	(۱)
EV	سؤال تحقیق از نظر علمی مرتبط است	(۲)
	معیارهای ورود (سوگیری انتخاب)	
IV-EV	شرح معیارهای ورود و خروج	(۳)
IV	معیارهای ورود و خروج برای همه گروه‌های آزمایش شده یکسان است	(۴)
EV	معیارهای ورود و خروج منعکس‌کننده جمعیت (مقالات) عمومی است	(۵)
	جمع‌آوری داده‌ها (سوگیری عملکرد)	
IV-EV	جمع‌آوری داده‌ها به‌وضوح توصیف شده و قابل‌اعتماد است	(۶)
IV	روش جمع‌آوری داده‌ها برای همه ورزشکاران یکسان است	(۷)
EV	تنظیمات استفاده شده پوشیدنی است	(۸)
	نقص داده (سوگیری فرسایشی)	
IV	نقص داده‌های مختلف بین گروه‌ها	(۹)
EV		(۱۰)
	نتیجه (سوگیری تشخیص)	
EV	نتایج امکان کاربرد را فراهم می‌کند	(۱۱)
IV	نتایج برای همه ورزشکاران یکسان است	(۱۲)

کیفیت هر مطالعه از نظر اعتبار داخلی، آماری و بیرونی با استفاده از پرسشنامه گزارش شده (۶) ارزیابی شد. از همه نویسندگان خواسته شد که به یک چک لیست ۱۸ موردی پاسخ دهند، که بهینه‌سازی لیست‌های مشابهی است که برای بررسی‌ها استفاده می‌شود (۷). به‌طور خاص، چک لیست (جدول ۱) به ما امکان ارزیابی اطلاعات داخلی (سؤال شماره ۱،۳، ۴،۶، ۷،۹، ۱۲،۱۳، و ۱۴)، آماری و اعتبار خارجی (سؤال شماره ۲،۳، ۵،۶، ۸،۱۰ و ۱۱) را داد. نویسندگان به هر سؤال پرسشنامه یک امتیاز مثبت (یک امتیاز) یا منفی (صفر) اختصاص دادند و امتیاز نهایی با جمع امتیازهای اختصاص داده شده محاسبه شد. اگر یک مطالعه در ارزیابی اکثر نویسندگان (۸) به نمره مساوی یا بیشتر از ۱۱ (~۶۱٪ از حداکثر) برسد، به‌عنوان «کیفیت بالا» در نظر گرفته شد. در میان مقالاتی

که به‌عنوان «کیفیت بالا» شناسایی شده‌اند، نویسندگان زیر مجموعه‌ای از مقالات را انتخاب کردند که به‌طور کامل‌تر در نتایج و بحث‌ها بررسی می‌شوند. این انتخاب تنها با در نظر گرفتن مطالعاتی انجام شد که امتیاز کیفی حداقل ۱۵ را به‌دست آوردند تا شامل مطالعاتی شود که خطر سوگیری در آن‌ها کم بود.

نتایج

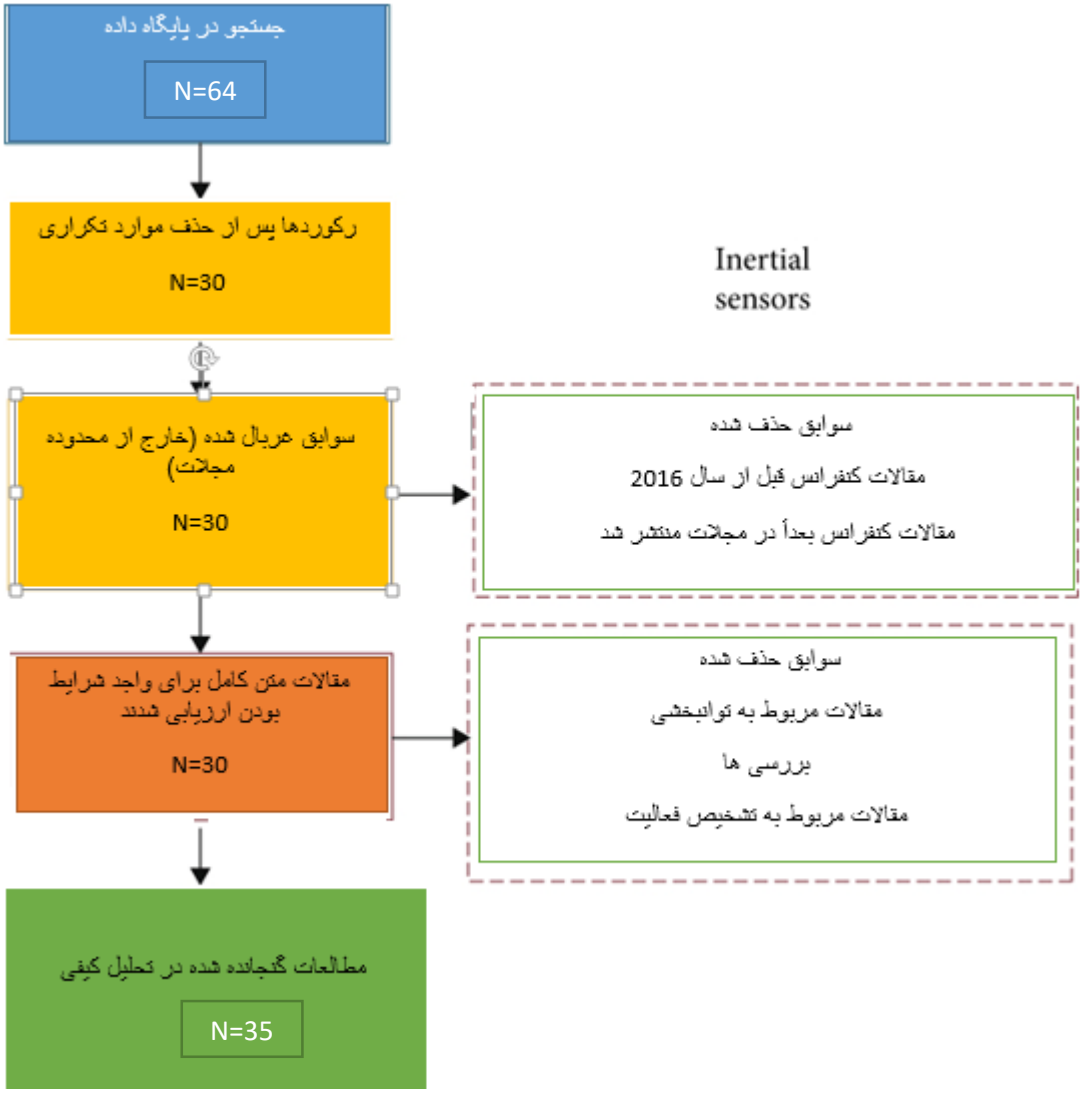
سنسورهای اینرسی

استفاده از حسگرهای اینرسی و دستگاه‌های حسگر پوشیدنی در ورزش در دهه گذشته رونق گرفته است. با یک جستجوی ساده در Scopus با استفاده از کلیدواژه‌های «ورزشی» و «حسگرهای اینرسی» نشان داده می‌شود که درمجموع ۳۷ مقاله منتشر شده در ژانویه تا مه ۲۰۲۰ را شناسایی می‌کند که با تعداد مقالاتی که با استفاده از عبارات جستجوی مشابه پیدا شده است یکسان است. طی دوره ۲۰۰۴–۲۰۰۹ حسگرهای اینرسی مدرن، تراشه‌های مینیاتوری کم‌مصرف هستند که در دستگاه‌های حسگر پوشیدنی یا تجهیزات هوشمند ادغام شده‌اند. سنسورهای اینرسی امروزی عمدتاً در گروه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی [1]قرار می‌گیرند که قابل‌حمل، مینیاتوری، سبک‌وزن، ارزان و کم‌توان هستند و عموماً شامل هر ترکیبی از شتاب‌سنج، ژیروسکوپ و مغناطیس‌سنج می‌شوند.

سنسورهای اینرسی برای اندازه‌گیری حالت‌های ایستا و پویا بدن ورزشکار استفاده می‌شود. در حالت استاتیک، برخی از مهم‌ترین پارامترها موقعیت مکانی، جهت‌گیری، وضعیت، زوایای بین اجزای بدن و غیره است. در حالت دینامیکی، پارامترهای مهم اضافی ممکن است شامل جابه‌جایی، مسیر حرکت، سرعت، شتاب خطی، حرکت تند (تغییر شتاب) باشد. درحالی‌که شتاب خطی (شتاب‌سنج)، سرعت زاویه‌ای (ژیروسکوپ) و جهت‌گیری (مغناطیس‌سنج) همگی می‌توانند مستقیماً اندازه‌گیری شوند، همه پارامترهای سینماتیکی دیگر باید از یک یا چند کمیت اندازه‌گیری شده استخراج شوند. به‌عنوان مثال، سرعت یک جسم با یکپارچه کردن شتاب آن در طول زمان و زاویه چرخش آن با یکپارچه کردن سرعت زاویه‌ای آن در طول زمان محاسبه می‌شود. نتایج اندازه‌گیری شده و به‌دست‌آمده می‌تواند تحت تأثیر عدم دقت حسگرهای MEMS باشد. بحث در مورد این موضوع در محدوده این مقاله نیست، اما برخی از دستورالعمل‌های مفید در مورد استفاده صحیح از حسگرهای اینرسی MEMS را می‌توان در (۹) یافت.

تعداد مقالاتی که به استفاده از حسگرهای اینرسی در ورزش می‌پردازند بسیار زیاد است و نمی‌توان آن‌ها را پردازش کرد. یک جستجوی ساده در پایگاه داده SCOPUS به‌تنهایی بیش از ۱۷۰۰ مقاله از این دست را به‌دست آورد. جستجوی اولیه با استفاده از عبارات جستجوی تعریف شده، ۶۴ مقاله به‌دست آورد. پس از بررسی نویسنده، نسخه تکراری و زبان، ۳۰ مقاله باقی ماند. پس از حذف مقالات کنفرانس‌های قدیمی‌تر و مقالات کنفرانسی که بعداً در یک مجله منتشر شد، چکیده ۳۵ مقاله باقی‌مانده را مطالعه کردیم. سپس همه مقالات و مقالات مروری مربوط به حسگرهای اینرسی و EMG، تشخیص فعالیت انسانی و تشخیص حالات انسانی را حذف کردیم. از ۶۴ مقاله باقیمانده، همه مقالات عمومی و غیراختصاصی ورزشی را حذف کردیم که ۳۵ مقاله برای مطالعه و تجزیه‌وتحلیل کامل باقی مانده است. فرآیند انتخاب در شکل ۱ نشان داده شده است.

1. MEMS



شکل ۱. فرآیند انتخاب مقالات متمرکز بر حسگرهای اینرسی. بلوک آبی نشان‌دهنده مرحله شناسایی، زرد مرحله غربالگری، قرمز مرحله واجد شرایط بودن و سبز مرحله گنجاندن است.

پس از تجزیه‌وتحلیل مقالات انتخاب‌شده، ما استفاده از حسگرهای اینرسی را بر اساس فعالیت ورزشی توصیف می‌کنیم. جدول ۲ توزیع مطالعات وارد شده بر اساس ورزش خاص را نشان می‌دهد.

جدول۲. منابع اندازه‌گیری سنسور اینرسی بر اساس ورزش‌های مختلف تجزیه و تحلیل شده

منابع	تعداد مطالعات	Sport/function
(۱۰)	۱	روی نوردیک‌پیاده
(۱۱–۱۳)	۳	دویدن
(۱۴–۱۶)	۳	تنیس
(۱۷)	۲	بیسبال
(۳)	۲	شنا کردن

دستگاه‌های حسگر پوشیدنی با سنسورهای اینرسی می‌توانند برای اندازه‌گیری و ارزیابی عملی هر فعالیت در ورزش استفاده شوند. با توجه به تعداد زیادی از فعالیت‌های ممکن، استفاده از حسگرهای اینرسی را در چند گروه از نمونه‌های مربوط به ورزش‌های مختلف مورد بحث قرار می‌دهیم.

استفاده بسیار مکرر از حسگرهای اینرسی برای اهداف مختلف در راه رفتن و دویدن یافت شد. تحلیل راه رفتن شاید کمترین مشکل در این گروه از اقدامات بود و مطالعات متعددی در این زمینه انجام شد. اولیورا و همکاران (۱۸) از یک دستگاه حسگر متحرک با شش حسگر اینرسی متصل به اندام تحتانی سوژه‌ها استفاده کرد و داده‌های به‌دست‌آمده را با سیستم OpenSim که یک نرم‌افزار منبع باز است، برای ایجاد و تجزیه‌وتحلیل شبیه‌سازی‌های دینامیکی حرکت تجزیه‌وتحلیل کرد. یک رویکرد جالب، با استفاده از تابع خود همبستگی برای ارزیابی منظم بودن حرکات چرخه‌ای انسان، از جمله راه رفتن، در (۱۹) ارائه شد. یک نسخه پر انرژی‌تر از راه رفتن پیاده‌روی، راه رفتن نوردیک است. پیاده‌روی نوردیک از اسکی برف نشئت می‌گیرد، به‌موجب آن فرد با استفاده از یک الگوی هماهنگی شبیه به اسکی روی کانتری که به درگیری عضلانی بالای بدن نسبت به حرکات معمولی پیاده‌روی نیاز دارد، از میله‌های دستی استفاده می‌کند. سزاری و همکاران (۲۰) از ۱۴ IMU[1] و روش رگرسیون برای تخمین مهارت‌های اکتسابی و تشخیص اشتباهات هماهنگی احتمالی در راه رفتن نوردیک استفاده کرد. گام بعدی استفاده از حسگرهای اینرسی است که در اقدامات در حال اجرا رخ می‌دهند. ازآنجایی‌که دویدن شکل پویاتری از راه رفتن است، نیاز به حسگرها بیشتر است. تعیین الگوی ضربه پا ایده اصلی در (۲۱) بود. نویسندگان از شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها برای محاسبه طول گام و تعیین استراتژی‌های فرود در سرعت دویدن استفاده کردند. به‌طور مشابه، زرینر و همکاران (۲۲) الگوریتم‌های مختلف آماری، پردازشگر سیگنال‌های دیجیتال[2] یادگیری عمیق را که برای محاسبه سرعت و طول گام در دویدن با استفاده از IMU استفاده می‌شوند. پویاترین حرکت در این گروه سرعت دویدن است. یک شتاب‌سنج قرار گرفته بر روی کمر دوندگان سرعت در (۲۳) برای ارزیابی سرعت بر اساس روش یادگیری ماشینی رگرسیون استفاده شد. مرتنز و همکاران (۲۴) از روش‌های اعتبارسنجی پیچیده از جمله تپانچه‌های لیزری و سیستم‌های جی پی اس سینماتیک آنلاین برای اندازه‌گیری سرعت اسپرینت با استفاده از تنها یک IMU با شتاب سنج و ژیروسکوپ یکپارچه استفاده کردند.

گروه دیگری از فعالیت‌ها که حسگرهای اینرسی می‌توانند بسیار مفید باشند، ورزش‌های راکت و بدمینتون هستند. استفاده معمولی از IMU در چنین اقداماتی روی دست / مچ / بازوی ورزشکار است. و انگ و همکاران (۲۵) یک پلتفرم اینترنت اشیا[3] را برای استفاده در ورزش‌های راکتی ابداع کردند. آن‌ها یک IMU را روی مچ دست ورزشکار قرار دادند و داده‌های به‌دست آمده را از طریق روش‌های یادگیری ماشینی پردازش کردند. آن‌ها ارزیابی‌های مهارتی را انجام دادند که به دنبال تمایز بین بازیکنان بدمینتون حرفه‌ای، سابلیت و آماتور بود. رویکردها و روش‌های مشابهی در (۲۵) مورد استفاده قرار گرفت، جایی که نویسندگان با سه IMU متصل به دست، مچ و آرنج ورزشکار ابداع کردند. این سیستم از روش‌های یادگیری عمیق برای ارائه اطلاعات مفید به مربیان در تمرین تنیس روی میز استفاده می‌کند. در میان ورزش‌های راکتی، تنیس برای استفاده از سیستم‌های حسگر اینرسی محبوب‌ترین به‌نظر می‌رسد. سیلوا و همکاران (۲۶) از دو دستگاه IMU متصل به مچ دست و زانوی ورزشکار برای ارزیابی عملکرد سرویس تنیس از طریق روش ماشین بردار پشتیبانی استفاده کرد. اهداف بسیار مشابهی در (۲۷) ارائه شد، جایی که نویسندگان از سه حسگر

1. Inertial measurement units
2. Digital Signal Processor
3. Internet of Things platform

ژیروسکوپ متصل به دست، بازو و قفسه سینه ورزشکار استفاده کردند. آن‌ها از روش‌های DSP، آماری و شبیه‌سازی برای ارزیابی مهارت اولین سرویس در تنیس استفاده کردند. تشخیص و طبقه‌بندی سکته مغزی نتیجه اصلی مقاله بود (۲۷). نویسندگان از روش‌های یادگیری ماشینی IMU و درخت تصمیم استفاده کردند تا سه ضربه معمولی تنیس را شناسایی و طبقه‌بندی کنند: فورهند، بک هند و سرویس با دقت ۹۸,۱ درصد. ارزیابی هماهنگی حرکت انسان با استفاده از سه IMU در لگن، مچ دست و قفسه سینه ورزشکار در (۲۷) ارائه شد. نویسندگان حرکت نوسان بیسبال را بر اساس روش تطبیق الگو ارزیابی کردند و به ورزشکاران و مربیان بازخورد دادند. ثبت بیومکانیک ورزشی سریع هسته اصلی کار ارائه شده در (۱۱) بود که به‌موجب آن IMUها بر روی سینه، بازو، مچ، دست و کمر قرار گرفتند تا با ترکیب شتاب سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها، حرکات دینامیکی بالا را به‌دست آورند. برای حرکات دینامیک، به‌ترتیب از شتاب سنج‌ها و ژیروسکوپ‌هایی با ± ۲۰۰ و ± ۲۰۰۰۰ درجه بر ثانیه استفاده شد. برای حرکات کم دینامیک به ترتیب از شتاب‌سنج و ژیروسکوپ با ۱۶± و ۱۰۰۰± درجه بر ثانیه استفاده شد. نتیجه کار آن‌ها یک پلتفرم حسگر دو برد پوشیدنی بود که بررسی پارامترهای بیومکانیکی با دامنه دینامیکی سطح بالا و بسیار گسترده را که نوسان بیسبال را توصیف می‌کرد، امکان‌پذیر کرد.

از دیدگاه‌های متعددی، چالش برانگیزترین فعالیت‌ها برای استفاده از واحدهای اینرسی، ورزش‌های آبی است. به‌عنوان مثال، دستگاه‌های حسگر پوشیدنی باید ضد آب باشند. بنابراین، طراحی و ساخت آن‌ها چالش برانگیزتر و گران‌تر است. همچنین سیگنال‌های رادیویی به‌خوبی به آب نفوذ نمی‌کنند. بنابراین، ارتباط بی‌سیم با یک دستگاه حسگر در زیر آب عملاً غیرممکن است. دمارچیز و همکاران (۱۲) از یک IMU با ۹ درجه آزادی برای ثبت وضعیت ستون فقرات کمری انسان در حین شنا استفاده کرد. به‌منظور تعیین کمیت حرکت ستون فقرات در طول شنا، آن‌ها از یک الگوریتم تخمین جهت‌گیری و یک مدل بیومکانیکی انسانی استفاده کردند. سیستم حسگر آن‌ها داده‌ها را به‌صورت آفلاین جمع‌آوری می‌کرد و پس از شنا، زمانی که شناگر از آب خارج می‌شد، آن‌ها را به‌صورت بی‌سیم به رایانه شخصی منتقل می‌کرد. کریستینسن و همکاران (۱۳) از یک شبکه حسگر بی‌سیم کم‌مصرف و دستگاه حسگر پوشیدنی متصل به سر شناگر برای ردیابی شناگران نخبه در زمان واقعی استفاده کردند. دستگاه حسگر پوشیدنی آن‌ها از سیگنال‌های ژیروسکوپ و شتاب‌سنج برای محاسبه مهم‌ترین پارامترهای شنا استفاده می‌کند و در مواقعی که سر شناگر خارج از آب است، آن‌ها را به رایانه شخصی ارسال می‌کند. رویکرد مشابهی توسط جیول و همکاران (۲۸) انجام شد، که در آن یک IMU با شتاب‌سنج و ژیروسکوپ به کمر متصل شد تا تعدادی از پارامترهای مربوط به شنا را برای هر چهار رشته شنا به دست آورد. دستگاه حسگر آن‌ها داده‌های شنا را به‌صورت آفلاین ضبط کرده و پس از شنا با استفاده از یک اتصال سیمی به رایانه شخصی منتقل می‌کند.

در مورد ارزیابی CoP، سانتوز و همکاران (۲۹) از کفی‌ها (پدار ایکس، نوول، مونیخ، آلمان) برای تعیین CoP و فشار پا در بازیکنان نخبه و تفریحی هاکی روی یخ در اسکیت رو به جلو و حالت ثابت استفاده کرد. اگرچه نیروهای کف‌پایی اندازه‌گیری شده توسط کفی‌ها بین ورزشکاران نخبه و تفریحی تفاوتی نداشت، یافته‌ای که با مطالعات اسکیت مطابقت دارد، CoP بین سطح ورزشکاران متفاوت بود. بازیکنان نخبه در مقایسه با بازیکنان تفریحی در طول اسکیت حالت ثابت، CoP را بیشتر در جلوی پا داشتند (۲۹). اگرچه در این مطالعه فقط اسکیت رو به جلو در نظر گرفته شد، این اندازه‌گیری با کفی برای ارزیابی سایر فعالیت‌های انجام شده در بازی‌های هاکی روی یخ قابل استفاده است.

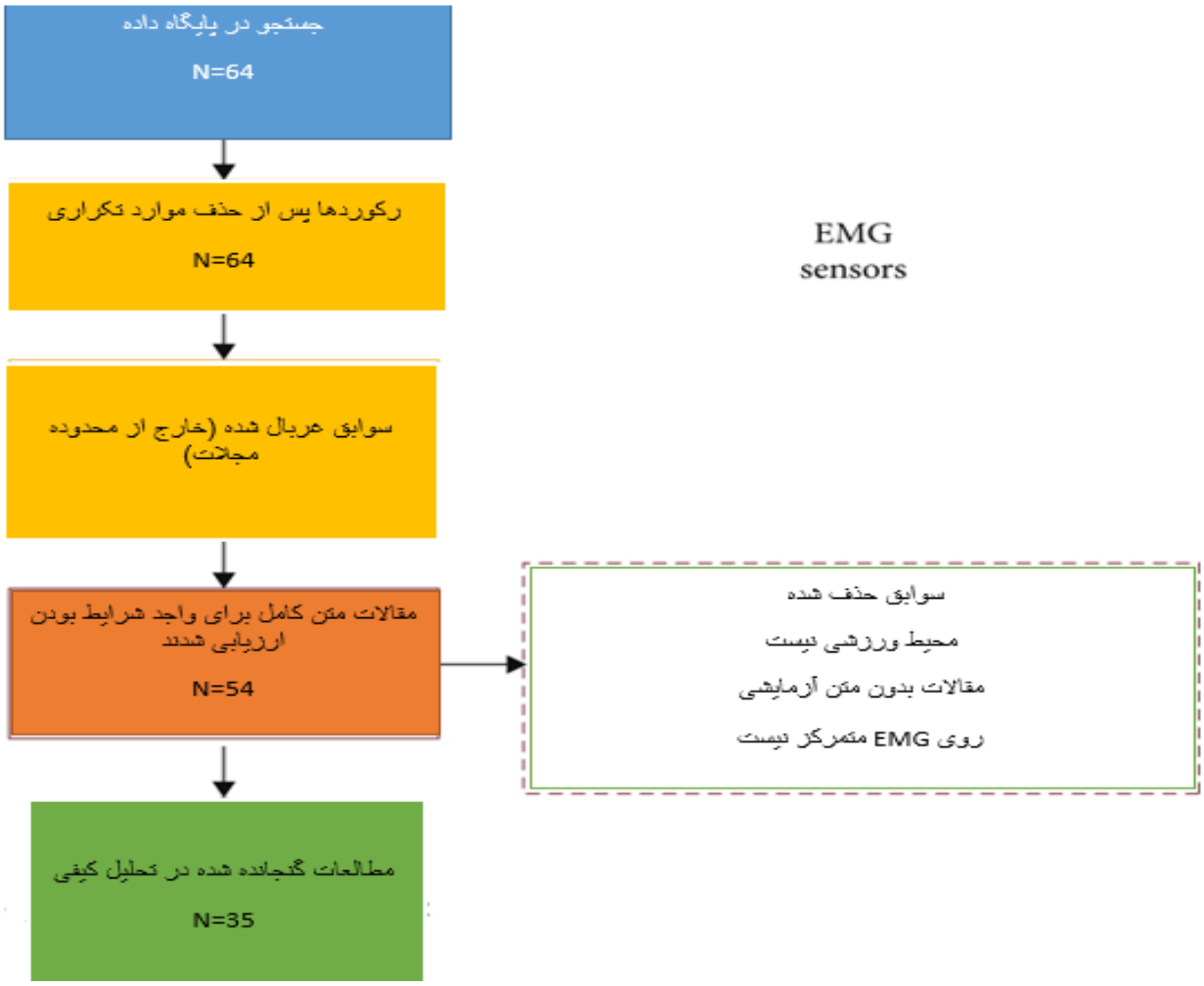
الکترومیوگرافی

کاربردهای الکترومیوگرافی سطحی (sEMG)[1]در علوم ورزشی در دهه گذشته به‌طور فزاینده‌ای رایج و متنوع شده است (۲۹). احتمالاً به لطف ظهور سیستم‌های بی‌سیم، sEMG امروزه نه‌تنها به‌عنوان یک ابزار توصیفی بلکه در مطالعات کمی نیز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. راه‌اندازی‌های دوقطبی (یعنی با استفاده از مجموعه‌ای از دو الکترود) در علم ورزش برای ثبت غیرتهاجمی جمع پتانسیل‌های عمل روی پوست رایج هستند و به‌عنوان خروجی یک سیگنال آنالوگ ارائه می‌دهند که تفاوت پتانسیل الکتریکی (ولتاژ) شناسایی شده بین دو الکترود را توصیف می‌کند. از طریق روش‌های پس پردازش خاص، مانند تصحیح و فیلتر کردن سیگنال، محققان می‌توانند از ضبط‌های sEMG چند عضله‌ای برای توصیف و یا تعیین کمیت فعال‌سازی هماهنگ شده توسط سیستم عصبی مرکزی[2]برای تولید و کنترل حرکت استفاده کنند (۲۹). از ۳۵ مطالعه در نظر گرفته شده در این بخش، حدود نیمی از آن‌ها از رویکردهای کلاسیک برای تجزیه‌وتحلیل sEMG پیروی کردند که منجر به محاسبه پارامترهای دامنه، زمان و فرکانس شد.

هم‌افزایی عضلات

مفهوم هم‌افزایی عضلانی بر این واقعیت استوار است که CNS باید دائماً با تعداد بیش‌ازحد درجات آزادی سروکار داشته باشد (۲۰). بر اساس پژوهش تابوری و همکاران (۱۹)، پیشنهاد کردند که CNS ممکن است تولید و کنترل حرکت را با فعال کردن عضلات به‌صورت گروهی و نه به‌صورت فردی، در الگوهای رایج به نام هم‌افزایی (۲۱) ساده کند. حتی اگر یک اثبات تجربی مستقیم برای این نظریه در حال حاضر وجود ندارد، هم‌افزایی عضلات به‌طور فزاینده‌ای در علم ورزش برای حدس و گمان در مورد معنای فیزیولوژیکی الگوهای فعال‌سازی هماهنگ عضلانی یا ارائه ضبط‌های sEMG چند عضله‌ای به روش فشرده استفاده می‌شود. هم‌افزایی عضلانی درواقع با فاکتورسازی سیگنال‌های sEMG به‌دست می‌آید؛ یک روش عددی که امکان کاهش ابعاد مجموعه داده‌های بزرگ را از طریق تکنیک‌های تجزیه مانند فاکتورسازی ماتریس غیر منفی[3] تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی[4] تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های مستقل، فراهم می‌کند (۲۰, ۲۱). همه این روش‌ها سری‌های زمانی sEMG را به مجموعه‌ای از ماژول‌های حرکتی کاهش می‌دهند، که سهم نسبی عضلات منفرد را در یک هم‌افزایی خاص توصیف می‌کنند که مشترک هستند. الگوهای فعال‌سازی مطالعات در مورد قابلیت اطمینان استخراج هم‌افزایی عضلانی در رابطه با فعالیت‌های ورزشی کمیاب است، اما بااین‌وجود در متون مورد نظر وجود دارد (۱۴–۱۶, ۳۰). رایج‌ترین خانواده الگوریتم‌های مورد استفاده برای کاهش ابعاد داده‌ها NMF بود (۱۱, ۲۷)، با چند مطالعه از PCA برای استخراج فعالیت‌های هم‌افزایی عضلانی استفاده شد (۲۳–۲۵). تعداد کل فعالیت‌های عضلات ثبت شده به‌شدت در مطالعات در نظر گرفته شده متفاوت بود. ما محدوده‌ای را در تعداد عضلات ثبت شده در این مطالعات یافتیم، از جمله یک تا هشت (۱, ۲, ۴, ۶, ۷, ۲۵, ۲۷, ۳۱)، و بین ۱۶ تا ۲۵ عضله (۳۲). موردهای دوطرفه کمتر از یک طرفه بود (۱). اکثر مطالعات عضلات اندام تحتانی را در نظر گرفتند (۴, ۶, ۳۱)، حتی اگر تقریباً به همان اندازه عضلات از تنه و یا اندام فوقانی نیز در برگیرد (۷, ۸, ۱۹, ۲۱). تنها سه مطالعه به‌طور انحصاری بر روی بالاتنه متمرکز شدند (۵, ۶) (شکل ۲).

1. Surface electromyography
2. Central nervous system
3. Non-negative matrix factorization
4. Principal Component Analysis



شکل ۲. فرآیند انتخاب مقالات متمرکز بر حسگرهای EMG . بلوک آبی نشان‌دهنده مرحله شناسایی، زرد مرحله غربالگری، قرمز مرحله واجد شرایط بودن و سبز مرحله گنجاندن.

بحث

نتیجه‌گیری مشابهی نیز در مطالعه دیگری به‌دست آمد که هیچ ارتباط معنی‌داری بین سه معیار قدرت عضلانی مرکزی و تفاوت در قدرت فشار دادن شانه بالای سر دمبل هنگام ارزیابی روی نیمکت ثابت در مقایسه با یک توپ سوئیسی ناپایدار وجود ندارد (۳۳). به‌روشی مشابه، سامانی و همکارانش دامنه پوشش خطی سیگنال‌های sEMG ثبت شده از ۱۲ عضله دو طرفه تنه و اندام تحتانی را در حین تمرین اسکات درحالی‌که پایدار و ناپایدار بالا می‌برند، تجزیه‌وتحلیل کردند (۳۳). نویسندگان دریافتند که بارهای ناپایدار روی سطوح پایدار باعث کاهش فعال شدن ستون‌مهره‌ها می‌شود، اما فعال‌سازی عضله مورب بیرونی شکم را در مقایسه با بارهای پایدار افزایش می‌دهد. بااین‌حال، بلند کردن بارهای پایدار بر روی سطوح ناپایدار باعث افزایش فعال شدن بیشتر عضلات دیستال مانند دوقلوی داخلی، عضله دوسر رانی و پهن داخلی شد. نتیجه‌گیری از این مطالعه این بود که تغییر پایداری سطح تکیه‌گاه و یا پایداری بار می‌تواند اثرات متفاوتی بر فعالیت عضلانی آگونیست در مقایسه با عضلات تثبیت‌کننده داشته باشد. نیشیدا و همکارانش

شروع به بررسی پایداری سیگنال‌های sEMG ثبت شده از هشت عضله دو طرفه تنه و اندام فوقانی در طول پرس نیمکتی شامل بارهای پایدار (هلتر استاندارد) و ناپایدار (هالتر انعطاف‌پذیر با بارهای معلق با نوارهای الاستیک) کردند (۳۰). نویسندگان نماهای لیاپانوف سیگنال‌های sEMG را محاسبه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بارهای ناپایدار با کاهش ناپایداری سیگنال‌های sEMG (به‌عنوان مثال، نماهای لیاپانوف پایین‌تر) مدیریت می‌شوند. سایتو و همکاران هم‌افزایی از فعالیت ماهیچه‌ای ۱۲ عضله اندام تحتانی که در هنگام فرود تک‌پا از یک پرش جانبی روی یک سطح پایدار ثبت شده است، را ثابت کرد (۱۴). سپس سه بار در هفته به‌مدت چهار هفته به تمرین شرکت‌کنندگان روی سطح ناپایدار (تلو تلو خوردن) پرداختند و تأثیر تمرین بر هم‌افزایی عضلات را ارزیابی کردند. نویسندگان یک سازمان مدولار اصلاح شده از الگوهای فعال‌سازی عضلانی پس از تمرین تخته تکان را گزارش کردند، اما هیچ تغییری در تعداد هم‌افزایی عضلانی مشاهده نشد. به‌طور خاص، استراتژی فرود به جدایی از سهم نسبی پلانتارفلکسورها از دورسی فلکسورها و تثبیت‌کننده‌های مدیولترال (به‌ترتیب تیبیالیس قدامی و پرونئوس لانگوس) تغییر یافت. علاوه بر این، سهم نسبی عضلات ثانویه در هر ماژول حرکتی کاهش یافت. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که تمرین تخته تلو تلو خوردن مدولار فرود را تغییر می‌دهد و سهم نسبی گروه‌های عضلانی را به روشی خاص عملکردی توزیع می‌کند. دلوکا و همکارانش تأثیر اغتشاشات (سطح تکیه‌گاه) را بر سازمان مدولار تغییرات جهت در حین دویدن تجزیه‌وتحلیل کردند (۱۵). این مورد شامل ثبت فعالیت sEMG ۱۶ عضله همان طرف اندام تحتانی و تنه در طول مانورهای برش ۹۰ درجه جانبی در حین دویدن با و بدون سطح تکیه‌گاه بود. نتایج هیچ تفاوتی را در تعداد هم‌افزایی عضلات و اثرات جزئی اغتشاشات بر روی ماژول‌های حرکتی نشان نداد، درحالی‌که عضلات حرکتی اولیه دستخوش تغییرات قوی‌تری شدند. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که ویژگی‌های زمان‌بندی موتورهای اولیه احتمالاً تحت تأثیر ورودی حسی و ادغام فرمان نزولی قرار دارد (۱۶).

نتیجه‌گیری نهایی

حسگرهای پوشیدنی فرصتی امیدوارکننده برای ارزیابی کمی ظرفیت‌های عملکردی فردی ورزشکار در یک محیط زیست طبیعی فراهم می‌کنند. شواهد موجود برای استفاده از حسگرهای پوشیدنی در ورزش برای ورزشکاران دارای معلولیت عمدتاً بر ارزیابی عملکرد در ورزش‌های ویلچر متمرکز است. شاخص‌های اصلی عملکرد شامل شتاب‌های خطی و چرخشی ویلچر و میزان فعالیت عضلات اندام فوقانی بدن بود که به‌ترتیب توسط سنسورهای اینرسی و EMG اندازه‌گیری شد. ارزیابی عملکرد حرکتی در ورزش به‌دلیل سطح بالای رقابت در بین ورزشکاران، روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. حسگرهای پوشیدنی پتانسیل ارائه داده‌های کلیدی مربوط به تمرین و عملکرد رقابتی را دارند. در میان دیگر گزینه‌های حسگر، حسگرهای اینرسی گسترده‌ترین هستند. از تجزیه‌وتحلیل‌ها، همچنین باید برداشت شود که برخی از روش‌ها، به‌عنوان مثال، محاسبه زمان‌های اتصال از کفی‌های فشار، قبل از اینکه بیشتر در زمینه بیومکانیک ورزشی مورد استفاده قرار گیرند، باید اعتبارسنجی شوند تا اطمینان حاصل شود که چنین داده‌هایی از نظر روش شناختی محکمه‌پسند هستند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مقاله از نوع مروری است و مستقیماً از هیچ انسانی یا حیوانی در آن استفاده نشده است.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در طراحی، اجرا و نگارش همه بخش‌های پژوهش حاضر مشارکت داشته‌اند.

تعارض

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

Reference

1. Mercado-Aguirre IM, Contreras-Ortiz SH, editors. Design and construction of a wearable wireless electrogoniometer for joint angle measurements in sports. VII Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2016, Bucaramanga, Santander, Colombia, October 26th-28th, 2016; 2017: Springer. [DOI:10.1007/978-981-10-4086-3_98]

2. Carvalho H, Palacios D, Lima C, Melo M, Silveira L, Zângaro R, editors. Dispersive Raman analysis of sacha inchi ozonated oil. VII Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2016, Bucaramanga, Santander, Colombia, October 26th-28th, 2016; 2017: Springer. [DOI:10.1007/978-981-10-4086-3_190]

3. Nagano A, Komura T, Fukashiro S. Optimal coordination of maximal-effort horizontal and vertical jump motions-a computer simulation study. Biomedical engineering online. 2007;6(1):1-9. [DOI:10.1186/1475-925X-6-1] [PMID] [PMCID]

4. Pearn J. Two early dynamometers: an historical account of the earliest measurements to study human muscular strength. Journal of the Neurological sciences. 1978;37(1-2):127-134. [DOI:10.1016/0022-510X(78)90233-2] [PMID]

5. Schubert MM, Seay RF, Spain KK, Clarke HE, Taylor JK. Reliability and validity of various laboratory methods of body composition assessment in young adults. Clinical physiology and functional imaging. 2019;39(2):150-159. [DOI:10.1111/cpf.12550] [PMID]

6. Shenoy S. EMG in sports rehabilitation. British Journal of Sports Medicine. 2010;44(Suppl 1):i10-i10. [DOI:10.1136/bjsm.2010.078725.27]

7. Mannini A, Intille SS, Rosenberger M, Sabatini AM, Haskell W. Activity recognition using a single accelerometer placed at the wrist or ankle. Medicine and science in sports and exercise. 2013;45(11):2193. [DOI:10.1249/MSS.0b013e31829736d6] [PMID] [PMCID]

8. Mannini A, Trojaniello D, Cereatti A, Sabatini AM. A machine learning framework for gait classification using inertial sensors: Application to elderly, post-stroke and huntington's disease patients. Sensors. 2016;16(1):134. [DOI:10.3390/s16010134] [PMID] [PMCID]

9. Sabatini AM. Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing. Sensors. 2011;11(2):1489-1525. [DOI:10.3390/s110201489] [PMID] [PMCID]

10. Moon J. Body composition in athletes and sports nutrition: an examination of the bioimpedance analysis technique. European journal of clinical nutrition. 2013;67(1):S54-S59. [DOI:10.1038/ejcn.2012.165] [PMID]

11. Santuz A, Ekizos A, Janshen L, Mersmann F, Bohm S, Baltzopoulos V, et al. Modular control of human movement during running: an open access data set. Frontiers in physiology. 2018;9:1509. [DOI:10.3389/fphys.2018.01509] [PMID] [PMCID]

12. De Marchis C, Schmid M, Bibbo D, Castronovo AM, D'Alessio T, Conforto S. Feedback of mechanical effectiveness induces adaptations in motor modules during cycling. Frontiers in computational neuroscience. 2013;7:35. [DOI:10.3389/fncom.2013.00035] [PMID] [PMCID]

13. Kristiansen M, Samani A, Madeleine P, Hansen EA. Effects of 5 weeks of bench press training on muscle synergies: a randomized controlled study. Journal of Strength and Conditioning Research. 2016;30(7):1948-1959. [DOI:10.1519/JSC.0000000000001282] [PMID]

14. Saito A, Tomita A, Ando R, Watanabe K, Akima H. Muscle synergies are consistent across level and uphill treadmill running. Scientific reports. 2018;8(1):5979. [DOI:10.1038/s41598-018-24332-z] [PMID] [PMCID]

15. De Luca CJ, Gilmore LD, Kuznetsov M, Roy SH. Filtering the surface EMG signal: Movement artifact and baseline noise contamination. Journal of biomechanics. 2010;43(8):1573-1579. [DOI:10.1016/j.jbiomech.2010.01.027] [PMID]

16. Besomi M, Hodges PW, Clancy EA, Van Dieën J, Hug F, Lowery M, et al. Consensus for experimental design in electromyography (CEDE) project: Amplitude normalization matrix. Journal of Electromyography and Kinesiology. 2020;53:102438. [DOI:10.1016/j.jelekin.2020.102438] [PMID]

17. McManus L, Lowery M, Merletti R, Søgaard K, Besomi M, Clancy EA, et al. Consensus for experimental design in electromyography (CEDE) project: Terminology matrix. Journal of Electromyography and Kinesiology. 2021;59:102565. [DOI:10.1016/j.jelekin.2021.102565] [PMID]

18. Oliveira AS, Gizzi L, Ketabi S, Farina D, Kersting UG. Modular control of treadmill vs overground running. PloS one. 2016;11(4):e0153307. [DOI:10.1371/journal.pone.0153307] [PMID] [PMCID]

19. Turpin NA, Costes A, Moretto P, Watier B. Can muscle coordination explain the advantage of using the standing position during intense cycling? Journal of Science and Medicine in Sport. 2017;20(6):611-616. [DOI:10.1016/j.jsams.2016.10.019] [PMID]

20. Cesari P, Camponogara I, Papetti S, Rocchesso D, Fontana F. Might as well jump: sound affects muscle activation in skateboarding. PLoS One. 2014;9(3):e90156. [DOI:10.1371/journal.pone.0090156] [PMID] [PMCID]

21. Taborri J, Palermo E, Del Prete Z, Rossi S. On the reliability and repeatability of surface electromyography factorization by muscle synergies in daily life activities. Applied bionics and biomechanics. 2018;2018. [DOI:10.1155/2018/5852307] [PMID] [PMCID]

22. Ozaki Y, Aoki R, Kimura T, Takashima Y, Yamada T, editors. Characterizing muscular activities using non-negative matrix factorization from EMG channels for driver swings in golf. 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC); 2016: IEEE. [DOI:10.1109/EMBC.2016.7590844] [PMID]

23. Santuz A, Ekizos A, Janshen L, Baltzopoulos V, Arampatzis A. The influence of footwear on the modular organization of running. Frontiers in physiology. 2017;8:958. [DOI:10.3389/fphys.2017.00958] [PMID] [PMCID]

24. Zych M, Rankin I, Holland D, Severini G. Temporal and spatial asymmetries during stationary cycling cause different feedforward and feedback modifications in the muscular control of the lower limbs. Journal of Neurophysiology. 2019;121(1):163-176. [DOI:10.1152/jn.00482.2018] [PMID]

25. Turpin NA, Guével A, Durand S, Hug F. Effect of power output on muscle coordination during rowing. European journal of applied physiology. 2011;111:3017-3029. [DOI:10.1007/s00421-011-1928-x] [PMID]

26. Silva PdB, Oliveira AS, Mrachacz-Kersting N, Kersting UG. Effects of wobble board training on single-leg landing neuromechanics. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2018;28(3):972-982. [DOI:10.1111/sms.13027] [PMID]

27. Smale KB, Shourijeh MS, Benoit DL. Use of muscle synergies and wavelet transforms to identify fatigue during squatting. Journal of Electromyography and Kinesiology. 2016;28:158-166. [DOI:10.1016/j.jelekin.2016.04.008] [PMID]

28. Jewell C, Hamill J, von Tscharner V, Boyer KA. Altered multi-muscle coordination patterns in habitual forefoot runners during a prolonged, exhaustive run. European journal of sport science. 2019;19(8):1062-1071. [DOI:10.1080/17461391.2019.1575912] [PMID]

29. Santuz A, Ekizos A, Janshen L, Baltzopoulos V, Arampatzis A. On the methodological implications of extracting muscle synergies from human locomotion. International journal of neural systems. 2017;27(05):1750007. [DOI:10.1142/S0129065717500071] [PMID]

30. Nishida K, Hagio S, Kibushi B, Moritani T, Kouzaki M. Comparison of muscle synergies for running between different foot strike patterns. PloS one. 2017;12(2):e0171535. [DOI:10.1371/journal.pone.0171535] [PMID] [PMCID]

31. Perez-Diaz-de-Cerio D, Hernández-Solana Á, Valdovinos A, Valenzuela JL. A low-cost tracking system for running race applications based on bluetooth low energy technology. Sensors. 2018;18(3):922. [DOI:10.3390/s18030922] [PMID] [PMCID]

32. Bergamini E, Ligorio G, Summa A, Vannozzi G, Cappozzo A, Sabatini AM. Estimating orientation using magnetic and inertial sensors and different sensor fusion approaches: Accuracy assessment in manual and locomotion tasks. Sensors. 2014;14(10):18625-18649. [DOI:10.3390/s141018625] [PMID] [PMCID]

33. Samani A, Kristiansen M. Inter-and intrasubject similarity of muscle synergies during bench press with slow and fast velocity. Motor Control. 2018;22(1):100-115. [DOI:10.1123/mc.2016-0026] [PMID]