

Сучасні тренди біомеханічних технологій у спорті

Ірина Козак², Олександр Жирнов¹

¹Державний науково-дослідний інститут фізичної культури і спорту, Київ, Україна;

²Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ, Україна

Анотація. Розглянуто сучасні тренди розвитку біомеханічних технологій, які використовують для об'єктивного аналізу рухів, побудови моделей та визначення кількісних параметрів рухової діяльності, а також забезпечення оберненого зв'язку в системі багаторічної підготовки спортсменів. *Мета.* На основі аналізу сучасних наукових даних виявити тренди розвитку наявних методів та технологій біомеханічного оцінювання рухових дій у спорті. *Методи.* Теоретичний аналіз, систематизація та узагальнення сучасної науково-методичної літератури, інтернет-ресурсів з проблеми дослідження. *Результати.* Одним із сучасних трендів розвитку методології біомеханічних досліджень є інтеграція та уніфікація різних методів та систем аналізу рухів, що значно спрощує роботу відповідних спеціалістів. Ще одним трендом розвитку систем реєстрації та аналізу рухів є отримання в режимі реального часу не лише характеристик рухової дії, а й повноцінних математичних моделей руху, заснованих на статистичній обробці результатів біомеханічного аналізу. Сучасні інноваційні технології, що дозволяють об'єктивно оцінити біомеханічні параметри рухів спортсмена та корегувати і вдосколювати їх значно підвищують ефективність системи підготовки спортсменів на всіх етапах багаторічної підготовки. Також методи біомеханічного аналізу дозволяють об'єктивно, інформативно та в режимі реального часу отримувати кількісні та якісні дані про рухові дії спортсменів. Подальший розвиток і використання біомеханічних методів та технологій дослідження рухів у спорті дозволить підвищити ефективність технічної підготовки та покращити результативність спортивної діяльності. Різноманітність сучасних біомеханічних технологій дозволяє здійснювати точне оцінювання та якісний аналіз рухових дій спортсмена як в умовах наукових лабораторій, так і тренувань чи змагань, а також створювати моделі окремих рухів та забезпечувати обернений зв'язок під час навчання. Одними з основних трендів розвитку біомеханічних технологій є: інтеграція та уніфікація різних методів і систем аналізу рухів, отримання в режимі реального часу не лише характеристик рухової дії, а й повноцінних математичних моделей руху, заснованих на статистичній обробці результатів біомеханічного аналізу.

Ключові слова: біомеханіка; сучасні технології; тренди розвитку.

Iryna Kozak, Oleksandr Zhyrnov

MODERN TRENDS IN BIOMECHANICAL TECHNOLOGIES IN SPORTS

Abstract. The article examines modern trends in the development of biomechanical technologies used for objective analysis of movements, construction of models, and measurement of quantitative parameters of physical activity, as well as providing feedback in the system of long-term preparation of athletes. *Objective.* To identify trends in the development of existing methods and technologies of biomechanical assessment of motor actions in sport based on the analysis of contemporary scientific data. *Methods.* Theoretical analysis, systematisation and generalisation of contemporary scientific and methodological literature, and Internet resources related to the research topic. *Results.* One of the modern trends in the development of methodology of biomechanical research is the integration and unification of various methods and systems of movement analysis, which greatly simplifies the work of relevant specialists. Another trend in the development of motion recording and analysis systems is to obtain in real time not only the characteristics of a motor action, but also full-fledged mathematical models of movement based on statistical analysis of the results of biomechanical analysis. Modern innovative technologies, which allow to objectively assess the biomechanical parameters of an athlete's movements and correct and improve them, significantly increase the efficiency of the athletes' training system at all stages of long-term preparation. In addition, biomechanical analysis methods allow for measuring objective, informative, and real-time quantitative and qualitative data on athletes' movements.

Kozak I., Zhyrnov O. Modern trends in biomechanical technologies in sports. *Theory and Methods of Physical Education and Sports.* 2023; 4: 20–26
DOI: 10.32652/tmfvs.2023.4.20–26

Козак І., Жирнов О. Сучасні тренди біомеханічних технологій у спорті. *Теорія і методика фізичного виховання і спорту.* 2023; 4: 20–26
DOI: 10.32652/tmfvs.2023.4.20–26

Вступ. На сучасному етапі розвитку спорту для забезпечення конкурентоспроможності на міжнародних змаганнях необхідна ефективна система підготовки висококваліфікованих спортсменів. Серед основних складових підготовленості спортсмена, таких як фізична, психологічна та техніко-тактична підготовленість, остання значно ускладнюється без використання в системі підготовки сучасних інноваційних технологій, що дозволяють об'єктивно оцінити біомеханічні параметри рухів спортсмена та визначити напрями її вдосконалення.

Технічна підготовленість спортсменів виражається ступенем засвоєння рухових дій, необхідних для досягнення високих спортивних результатів. До основних характеристик технічної підготовленості відносять ефективність, стабільність, варіативність та економічність техніки виконання рухових дій [25, 30, 35, 37]. Важливу роль у процесі формування, розвитку та вдосконалення технічної підготовленості відіграє контроль як окремих елементів рухових дій, так і їх виконання в цілому. Умовою ефективного навчання є наявність та використання оберненого біологічного зв'язку. В процесі вдосконалення технічної підготовленості роль оберненого зв'язку, а також об'єктивного контролю за якістю виконання рухових дій та інструменту для корекції можливих помилок при їх реалізації відіграють методи та технології біомеханічного аналізу [9, 25, 35].

За останнє десятиліття з'явилися нові технології, які дозволяють розвивати різні напрями біомеханічного аналізу в спорті. Актуальним напрямом підвищення ефективності техніко-тактичної підготовки є розробка та впровадження нових технологій для використання у тренувальній діяльності спортсменів, а також для покращення результатів їх змагальної діяльності. При цьому кожен вид спорту потребує різних підходів

Further development and use of biomechanical methods and technologies for studying movements in sports will increase the effectiveness of technical training and improve the performance of sports activities. The variety of modern biomechanical technologies allows for accurate assessment and qualitative analysis of athlete's movements both in scientific laboratories and during training or competitions, as well as for creating models of individual movements and providing feedback during training. One of the main trends in the development of biomechanical technologies is the integration and unification of various methods and systems of movement analysis, obtaining in real time not only the characteristics of the motor action, but also full-fledged mathematical models of movement based on statistical processing of the results of biomechanical analysis.

Keywords: biomechanics, modern technologies, development trends.

до технології реєстрації, оцінювання та аналізу техніки виконання рухових дій спортсменів. З кожним роком з'являється все більше ефективних мобільних технологій, що розширюють можливості досліджень біомеханіки рухів спортсменів та їх коригування [10, 19].

Систематизація, аналіз та виявлення основних трендів розвитку існуючих методів і технологій біомеханіки є актуальною проблемою спортивної науки, вирішення якої дозволить розширити арсенал можливих наукових досліджень у спорті, а також підвищити їх методологічний рівень. Розуміння можливостей сучасних біомеханічних технологій має практичне значення для системи відбору, контролю технічної підготовленості на різ-

них етапах багаторічної підготовки спортсменів.

Мета дослідження – на основі аналізу сучасних наукових даних виявити тренди розвитку наявних методів та технологій біомеханічного оцінювання рухових дій у спорті.

Методи дослідження: теоретичний аналіз, систематизація та узагальнення сучасної науково-методичної літератури, інтернет-ресурсів з проблеми дослідження.

Результати дослідження. На сучасному етапі розвитку наукових знань до біомеханічних методів інструментального контролю висувають ряд вимог, які підвищують якість процесу підготовки спортсменів, а саме: мінімальний вплив вимірювальних приладів на техніку рухових дій, максимальна оперативність отримання

інформації, можливість використання в тренувальному та змагальному процесі. В біомеханіці виділяють дві групи методів інструментального контролю та аналізу рухів людини: контактні (механо-електричні) та безконтактні (оптико-електронні) [22, 39]. Різниця між основними групами біомеханічних досліджень полягає у способі реєстрації та передачі інформації на реєструючий пристрій.

Контактні методи передбачають наявність реєструючих сенсорів, що безпосередньо кріпляться до тіла. Інформація від носія до реєструючого приладу передається за допомогою електричного сигналу дротовим або бездротовим способом. Ці методи засновані на перетворенні механічних параметрів в електричний сигнал з наступною їх реєстрацією та аналізом. До групи контактних методів відносять інерціальні системи захоплення та аналізу рухів; електротензодинамографію (ЕТДГ); поверхневу електроміографію (пЕМГ); стабілометрію (табл. 1) [24, 27]. При використанні контактних методів основною проблемою є неможливість застосовувати більшість вимірювальних систем на змаганнях. Також високі вимо-

Таблиця 1. Групи сучасних біомеханічних методів та технологій

Групи методів	Технології		Приклади	
Контактні (механо-електричні)	Інерціальні системи захоплення та аналізу рухів		Xsens (Нідерланди), Trigno (США)	
	Електротензодинамографія (ЕТДГ)		ForceDecks (США), Kistler force plate (Швейцарія), Bertec force plate (США)	
	Поверхнева електроміографія (пЕМГ)		Delsys Trigno (США), Cometa (Італія)	
	Комп'ютерна стабілометрія		MobileMat (США), SB Mat (США), HUR SmartBalance (Фінляндія)	
Безконтактні (оптико-електронні)	Відеоаналіз	Система аналізу рухів	Visual 3D (США), Theia 3D (Канада), Dartfish (Швейцарія)	
		Системи захоплення рухів	Маркерні	Vicon (Велика Британія), Qualisys (Швеція)
			Безмаркерні	Contemplas (Німеччина), Simi motion (Німеччина)
	Оптико-електронні системи хронометрії, спідометрії та аналізу рухів		RadioSpeed (Італія), OptoGait (Італія)	

ги ставлять до ергономічності датчиків та кріплень їх на тілі спортсмена.

Безконтактні методи дослідження та контролю рухів не передбачають фізичного контакту з об'єктом дослідження (сенсори не кріпляться на тіло спортсмена), також технології цієї групи методів використовують бездротову передачу інформації на реєструючий прилад. Основою безконтактних методів є застосування оптико-електронного способу реєстрації та передачі даних. До групи безконтактних методів дослідження рухової діяльності відносять відеозйомку; оптико-електронні системи реєстрації та аналізу рухів; програмне забезпечення для аналізу рухів (див. табл. 1) [20, 26, 42].

Подальшим дослідженням є аналіз сучасного стану застосування в практиці спорту зазначених інструментальних методів аналізу рухових дій людини в практиці спорту та визначення трендів їх розвитку.

Інерціальні системи захоплення та аналізу рухів дозволяють визначити кінематичні характеристики тіла людини, а також його ланок у режимі реального часу за допомогою спеціальних бездротових сенсорів. Основою цієї системи є технологія мотсар (motion capture – захоплення рухів), що дозволяє створення тривимірної моделі шляхом оцифрування рухів [16, 34, 36].

Яскравим представником сучасних інерціальних систем є Xsens. Основним завданням цієї системи є перетворення рухів спортсменів у цифрову модель без використання камер. Частіше систему застосовують у сфері кінематографії для анімації персонажів, хоча сьогодні все частіше зустрічається у науковій сфері для дослідження техніки виконання рухів та біологічного оберненого зв'язку під час навчання або корекції рухових дій. Система Xsens включає три варіанти технології мотсар, а саме: MVN Link, MVN Awinda та MVN Awinda Starter. Базова комплектація має 17 інерціальних сенсорів (3D IMU – інерційна одиниця виміру): гіроскоп, акселерометр та магнітометр, які кріплять на тіло. Деякі сенсори мають барометр та GNSS (глобальна навігаційна супутникова система).

Таблиця 2. Характеристика інерціальних систем захоплення та аналізу рухів

1.	Вартість обладнання	***
2.	Використання та реєстрація даних в режимі реального часу	✓
3.	Наявність автономного режиму роботи	✓
4.	Наявність вимог до зони дослідження (освітлення, тип підлоги тощо)	–
5.	Комплексна оцінка рухових дій (широкий спектр параметрів виміру та аналізу)	✓
6.	Обмежена портативність (потреба в стаціонарному розміщенні)	–
7.	Обмеження рухових дій, що можуть бути зареєстровані та оцінені	–
8.	Потреба у калібруванні	✓
9.	Складність аналізу та обробки даних	**
10.	Складність у використанні (потреба спеціальної технічної підготовки спеціалістів)	**
11.	Точність виміру	***

Умовні позначення: ** – середня; *** – висока.

Система Xsens дозволяє досліджувати рухи, як у приміщенні, так і на відкритій місцевості, а також практично не обмежує рухову діяльність спортсменів [21, 31, 32] (табл. 2).

Сучасні інерціальні системи захоплення та аналізу рухів дозволяють у реальному часі отримати повні дані про кінематичну структуру рухів (три-вимірну анімацію руху та кількісні показники кінематичних характеристик).

Електротензодинамографія (ЕТДГ) – це технологія вимірювання силових характеристик за допомогою електронних тензосенсорів при взаємодії з опорою або будь-якими об'єктами навколишнього середовища [13, 28].

Універсальним приладом ЕТДГ для визначення силових характеристик та вектора зусиль є тензоплатформа, яка може бути розміщена на доріжках стадіонів або в будь-якому місці взаємодії спортсменів з опорою. Найбільшого поширення тензоплатформи набули в таких видах спорту, як легка атлетика (ходьба, біг, стрибки), акробатика, гімнастика [13, 28].

В окремих випадках ЕТДГ передбачає кріплення компактних тензосенсорів до будь-якого спортивного предмета для реєстрації силових характеристик. Прикладами застосування ЕТДГ в окремих видах спорту є веслування (кріплення тензосенсорів на весло), велоспорт (кріплення до педалі велосипеда), легка атлетика (тензодатчики у взутті) тощо [13, 28, 40].

Одним з представників методики електротензодинамографії є силовимірвальна платформа ForceDecks. Перевагами ForceDecks над іншими

представниками є наявність бездротового зв'язку та можливість передавати дані в процесі тестування на мобільні пристрої, що дає змогу досліднику знаходитись віддалено (табл. 3).

Поверхнева електроміографія (пЕМГ) – це технологія дослідження біоелектричної активності скелетних м'язів у стані спокою, а також під час виконання рухів за допомогою електродів, прикріплених над руховою точкою м'яза та їх передачі на реєструючий пристрій [6, 24].

Сучасні найбільш поширені моделі електроміографів передбачають від двох до 16 каналів, що дозволяють одночасно досліджувати відповідну кількість м'язів. Проте, існують спеціалізовані електроміографи з більшою кількістю каналів, що можуть включати до 100 каналів одночасно, що використовуються для наукових досліджень та в клінічній практиці [6, 24].

Яскравими представниками сучасної поверхневої електроміографії є Delsys Trigno, Cometa (табл. 4).

Одним з напрямів розвитку сучасної електроміографії є зменшення розміру електродів з підсилювачем та передавачем сигналу в мініатюрний блок, що кріпиться на тілі тестованого та передає дані на приймаючий пристрій за допомогою бездротових технологій.

Комп'ютерна стабілометрія – технологія оцінювання функціонального стану вестибулярного та опорно-рухового апарату (ОРА) людини у статичному та динамічному режимах. Об'єктом дослідження є коливання загального центру тяжіння та опорної функції стопи [23, 8, 38]. Реєструю-

Таблиця 3. Характеристика методик елетротензодинамографії

1.	Вартість обладнання	**
2.	Використання та реєстрація даних в режимі реального часу	✓
3.	Наявність автономного режиму роботи	✓-
4.	Наявність вимог до зони дослідження (освітлення, тип підлоги тощо)	***
5.	Комплексна оцінка рухових дій (широкий спектр параметрів виміру та аналізу)	-
6.	Обмежена портативність (потреба в стаціонарному розміщенні)	✓-
7.	Обмеження рухових дій, що можуть бути зареєстровані та оцінені	✓-
8.	Потреба у калібруванні	✓-
9.	Складність аналізу та обробки даних	*
10.	Складність у використанні (потреба спеціальної технічної підготовки спеціалістів)	*
11.	Точність виміру	***

Умовні позначення: * – низька; ** – середня; *** – висока.

Таблиця 4. Характеристика поверхневої електроміографії

1.	Вартість обладнання	**
2.	Використання та реєстрація даних в режимі реального часу	✓
3.	Наявність автономного режиму роботи	-
4.	Наявність вимог до зони дослідження (освітлення, тип підлоги тощо)	***
5.	Комплексна оцінка рухових дій (широкий спектр параметрів виміру та аналізу)	✓
6.	Обмежена портативність (потреба в стаціонарному розміщенні)	-
7.	Обмеження рухових дій спортсменів	-
8.	Потреба у калібруванні	-
9.	Складність аналізу та обробки даних	**
10.	Складність у використанні (потреба спеціальної технічної підготовки спеціалістів)	***
11.	Точність виміру	**

Умовні позначення: ** – середня; *** – висока.

Таблиця 5. Характеристика стабілометрів

1.	Вартість обладнання	**
2.	Використання та реєстрація даних в режимі реального часу	✓
3.	Наявність автономного режиму роботи	✓
4.	Наявність вимог до зони дослідження (освітлення, тип підлоги тощо)	*
5.	Комплексна оцінка рухових дій (широкий спектр параметрів виміру та аналізу)	-
6.	Обмежена портативність (потреба в стаціонарному розміщенні)	✓
7.	Обмеження рухових дій спортсменів	-
8.	Потреба у калібруванні	-
9.	Складність аналізу та обробки даних	*
10.	Складність у використанні (потреба спеціальної технічної підготовки спеціалістів)	*
11.	Точність виміру	***

Умовні позначення: * – низька; ** – середня; *** – висока.

чим приладом є стабілоплатформа, або інерціальний датчик прикріплений наближено до загального центру маси тіла (ЗЦМ). Пристрої містять сенсори та електронну систему збору і обробки відхилення та швидкість ко-

ливань ЗЦМ для подальшого аналізу [4, 8, 38].

Стабілоплатформи можуть бути різного типу, але зазвичай поділяються за напрямом дослідження: статичні або динамічні. Дослідження, за-

лежно від їх мети, можуть проводитися практично в будь-якому положенні тіла іспитованого. Під час дослідження стабілометр фіксує дані про коливання ЗЦМ тіла та здатність підтримувати рівновагу у статичному положенні [4, 8, 38].

Прикладами сучасних стабілоплатформ є MobileMat, SB Mat, HUR SmartBalance (табл. 5).

Сучасні системи **відеоаналізу** рухів включають технології захоплення, реєстрації та аналізу рухів з подальшою побудовою дво- та тривимірних моделей візуалізації рухів та фіксації кінематичних характеристик рухових дій. Відеоаналіз може бути використано як для візуального оцінювання та порівняння виконання рухових дій, так і для визначення їхніх кінематичних характеристик, у тому числі швидкості, прискорення, кутової швидкості тощо [3, 17, 40].

Системи відеоаналізу використовують різні технології, включаючи системи захоплення та аналізу рухів, розпізнавання обличчя, вимірювання розміру та швидкості об'єктів тощо.

Системи аналізу рухів – це програмне забезпечення, що дозволяє автоматично визначати та аналізувати рухи на відео. Для цього застосовують методи комп'ютерного зору та статистичний аналіз даних. Комп'ютерний зір – алгоритми розпізнавання об'єктів у відеозаписах, у тому числі розпізнавання обличчя, рухів, форм, розмірів та положення об'єктів [18, 29, 33, 41].

Системи захоплення рухів – програмне та апаратне забезпечення, яке розпізнає об'єкти, що рухаються, та надає інформацію про ці об'єкти.

Окремо виділяють маркерну та безмаркерну систему захоплення рухів.

Маркерні системи захоплення рухів передбачають використання інфрачервоних відеокамер та спеціальних світловідбиваючих маркерів, що кріплять на тіло людини, за допомогою яких система точно визначає положення та межі об'єктів, а також відстежує їх рух на відео. Така технологія дозволяє високоточно визначати параметри рухів, таких як швидкість, прискорення, траєкторія тощо.

Таблиця 6. Характеристика системи захоплення та аналізу рухів

1.	Вартість обладнання	***
2.	Використання та реєстрація даних в режимі реального часу	√-
3.	Наявність автономного режиму роботи	√
4.	Наявність вимог до зони дослідження (освітлення, тип підлоги тощо)	***
5.	Комплексна оцінка рухових дій (широкий спектр параметрів виміру та аналізу)	√
6.	Обмежена портативність (потреба в стаціонарному розміщенні)	√
7.	Обмеження рухових дій спортсменів	-
8.	Потреба у калібруванні	√
9.	Складність аналізу та обробки даних	***
10.	Складність у використанні (потреба спеціальної технічної підготовки спеціалістів)	***
11.	Точність виміру	**

Умовні позначення: * * – середня; * * * – висока.

Таблиця 7. Характеристика оптичних систем хронометрії спідометрії та аналізу рухів

1.	Вартість обладнання	**
2.	Використання та реєстрація даних в режимі реального часу	√
3.	Наявність автономного режиму роботи	√
4.	Наявність вимог до зони дослідження (освітлення, тип підлоги тощо)	-
5.	Комплексна оцінка рухових дій (широкий спектр параметрів виміру та аналізу)	-
6.	Обмежена портативність (потреба в стаціонарному розміщенні)	-
7.	Обмеження рухових дій спортсменів	-
8.	Потреба у калібруванні	√
9.	Складність аналізу та обробки даних	*
10.	Складність у використанні (потреба спеціальної технічної підготовки спеціалістів)	*
11.	Точність виміру	***

Умовні позначення: * – низька; * * – середня; * * * – висока.

Безмаркерні системи захоплення рухів використовують для аналізу комп'ютерні алгоритми та методи комп'ютерного зору для визначення положення та переміщення об'єктів на відео.

Відеоаналіз є ефективним інструментом біомеханічних досліджень, що дозволяє, окрім оцінювання, будувати дво- та тривимірні моделі рухів, а також забезпечує обернений зв'язок під час навчання рухів [1, 2, 12, 14].

Прикладами сучасного програмного забезпечення аналізу рухів є Visual 3D, Theia 3D, Dartfish. Маркерні системи відеоаналізу – Vicon, Qualisys; безмаркерні системи – Contemphas, Simi motion (табл. 6).

На сучасному етапі розвитку біомеханічних досліджень системи реєстрації та аналізу рухів є одними з найефективніших методів отримання даних про кінематичну структуру

рухів людини. Крім того, в ці системи можуть інтегруватися різноманітні контактні методи реєстрації рухових дій: динамометрія, електроміографія тощо.

Оптична система хронометрії, спідометрії та аналізу рухів (система оптичних пар) – система виміру та аналізу часових та просторових параметрів рухів, що складається із фотодатчиків та джерела світла (лазерного променя) [5, 7, 11, 15]. Оптичні пари застосовують для вимірювання часових і просторових характеристик, на їх основі можуть бути виміряні час реакції, кількості та частоти кроків, відстані, швидкості та інших параметрів руху.

Яскравим представником оптичних систем аналізу рухів є OptoGate (табл. 7).

Одним із сучасних трендів розвитку методології біомеханічних дослі-

джень є інтеграція та уніфікація різних методів і систем аналізу рухів, що значно спрощує роботу спеціалістів, які працюють з цими методами. Так, наприклад, система аналізу рухів Trigno Avanti EMG + IMU Sensor дозволяє одночасно бездротове вимірювання поверхневої ЕМГ та кінематичних характеристик руху за допомогою IMU-датчика, що містить 3D-акселерометр, 3D-гіроскоп і 3D-магнітометр. Спроби інтеграції різних систем реєстрації рухів не є чимось новим у практиці спортивних досліджень, проте Trigno Avanti EMG + IMU Sensor, по суті, є одним вимірюваним приладом. Ще одним трендом розвитку систем реєстрації та аналізу рухів є отримання в режимі реального часу не лише характеристик рухової дії, а й повноцінних математичних моделей руху, заснованих на статистичній обробці результатів біомеханічного аналізу.

Дискусія. Особливостями практично всіх сучасних інструментальних методів дослідження рухів людини в спорті є отримання даних у режимі реального часу; мінімальні обмеження для спортсмена, в деяких випадках навіть можливість проведення досліджень у процесі змагальної діяльності; інтеграція різних інструментальних методів досліджень для отримання різнобічних даних про рухові дії. Все сказане дозволяє забезпечити оперативний, поточний та етапний контроль технічної підготовленості спортсмена, або оцінювання рівня розвитку рухових якостей.

Проте окрім оперативності отримання даних для спортсменів та тренерів важливо отримати саме інформативні показники, які можуть бути одразу використані в процесі підготовки. Але в більшості випадків визначення таких показників потребує проведення кількісного біомеханічного аналізу, статистичної обробки даних та побудови математичних моделей. Тому методики, які використовують для біомеханічних досліджень, дозволяють отримати лише обмежену кількість параметрів рухів, що самі по собі є інформативними, та одразу можуть бути використані в тренувально-

му процесі. Інший шлях – це розробка математичних моделей рухових дій, які розробляють заздалегідь та закладають безпосередньо в програмне забезпечення дослідницьких методик, що також дозволяє оперативно використовувати отримані дані в процесі тренування.

Такий підхід до аналізу рухових дій дозволяє підвищити ефективність навчання спортивних рухів, корекції технічних помилок та вдосконалення техніки рухів спортсменів на різних етапах багаторічної підготовки.

Висновки:

1. Сучасні інноваційні технології, що дозволяють об'єктивно оцінити біомеханічні параметри рухів спортсмена та корегувати і вдосконалювати їх, значно підвищують ефективність системи підготовки спортсменів на всіх етапах багаторічної підготовки. Також методи біомеханічного аналізу дозволяють об'єктивно, інформативно та в режимі реального часу отримувати кількісні та якісні дані про рухові дії спортсменів. Подальший розвиток і використання біомеханічних методів та технологій дослідження рухів у спорті дозволить підвищити ефективність технічної підготовки та покращити результативність спортивної діяльності.

2. Різноманітність сучасних біомеханічних технологій дозволяє здійснювати точне оцінювання та якісний аналіз рухових дій спортсмена як в умовах наукових лабораторій, так і тренувань чи змагань, а також створювати моделі окремих рухів та забезпечувати обернений зв'язок під час навчання.

3. Одними з основних трендів розвитку біомеханічних технологій є інтеграція та уніфікація різних методів та систем аналізу рухів та отримання в режимі реального часу не лише характеристик рухової дії, а й повноцінних математичних моделей руху, заснованих на статистичній обробці результатів біомеханічного аналізу.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють, що відсутній будь-який конфлікт інтересів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Arrigan DW, Moran KA, & Meehan K. Markerless motion capture systems: A systematic review of their accuracy. *Journal of Biomechanics*. 2021;122:110492. doi: 10.1016/j.jbiomech.2021.110492.
2. Baltieri D, & Brunetti F. Markerless motion capture using computer vision techniques: A systematic review. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2020;23(5):287–301. doi: 10.1080/10255842.2019.1695224.
3. Baradel F, Wolf C et al. Pose-conditioned joint angle limits for 3D human pose reconstruction. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*; 2017. p. 1175–1184.
4. Clark RA, Bryant AL, & Pua YH. Relationship between accelerometer-determined physical activity and balance performance in older adults. *Journal of Aging and Physical Activity*. 2014;22(3):488–495.
5. Clarke S, & Metcalfe A. Optical measurement systems for biomechanical analysis. *Sports Biomechanics*. 2014;13(3):332–347. doi: 10.1080/14763141.2014.933755.
6. Del Vecchio A, Negro F, Felici F, & Farina D. Associations between motor unit action potential properties and surface electromyography features. *Journal of Applied Physiology*. 2019;126(2):361–371.
7. Donath L, Faude O, Lichtenstein E, & Nüesch C. Application of optical motion capture for running gait analysis. *Sports Medicine*. 2016;46(4):1–14. doi: 10.1007/s40279-015-0436-y.
8. Duarte M, & Freitas SM. Revision of posturography based on force plate for balance evaluation. *Revista Brasileira de Fisioterapia*. 2015;19(3):183–190.
9. Farrow D, & Robertson S. The role of biomechanical analysis in skill acquisition and skill development. In N. J. Hodges & A. M. Williams (Eds.), *Skill acquisition in sport: Research, theory, and practice*. 2016;3:47–61. Routledge.
10. Fong DT, Chan YY, Mok KM, Yung PS, & Chan KM. Understanding lower extremity biomechanics during common sports movements to improve performance and reduce injury risk. *Journal of Sport and Health Science*. 2017;6(2):122–130.
11. Fonseca S, Gil J, & Costa L. A low-cost optical motion capture system for human locomotion analysis. *Journal of Biomechanics*. 2013;46(13):2292–2295. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.07.023.
12. Fotiadis G, Karatsidis A, & Bellusci G. Marker-based and markerless motion capture techniques for human motion analysis in biomechanics: A review. *European Journal of Translational Myology*. 2020;30(3):191–203. doi: 10.4081/ejtm.2019.8728.
13. Giacomozzi C. Methods for the quantification of the performance in gait analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2014;11(1):1–11.
14. Grigorescu S. Advances in markerless human motion capture for analysis of human movement. *Proceedings of the Romanian Academy. Series A, Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science*. 2015;16(3):272–279.
15. Han JS, Lee DH, & Shin CS. Gait analysis system using optical motion capture for evaluating functional rehabilitation. *Journal of Medical and Biological Engineering*. 2021;41(5):425–431. doi: 10.1007/s40846-021-00670-y.
16. Han J, & Lim YG. Wearable inertial sensors for human movement analysis. *Expert Review of Medical Devices*. 2013;10(5):689–705.
17. Hasan MS, Roy-Chowdhury AK, et al. Continuous body and hand action recognition in depth videos. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*. 2016;38(8):1644–1657.
18. Hossain MZ, & Hasan MM. An automated human motion analysis framework using computer vision and machine learning techniques. *Multimedia Tools and Applications*. 2020;79(15–16):11259–11288. doi: 10.1007/s11042-019-08394-3.
19. Hrysomallis C. Balance ability and athletic performance. *Sports Medicine*. 2017;47(11):2215–2233.
20. Hsieh WH, & Su FC. Markerless motion capture systems for personal computer-based biomechanical applications. *Sensors*. 2015;15(4):8592–8615.
21. Lin Y, Zheng R, Ge B, & Liu T. A real-time human motion capture system based on inertial measurement units and magnetometers. *Sensors*. 2018;18(9):2902.
22. Lu Z, & Jiang C. A review on the applications of wearable sensing systems in biomechanical analysis of human movement. *Sensors*. 2015;15(12):31378–31419.
23. Mansfield A, Peters AL, Liu BA, Maki BE, & Khan KM. A perturbation-based balance training program for older adults: Study protocol for a randomised controlled trial. *BMC Geriatrics*. 2015;15(1):1–12.
24. Merletti R, & Farina D. *Surface electromyography: Physiology, engineering, and applications*. John Wiley & Sons; 2016.
25. Mujika I, Halson S, Burke LM, Balagué G, & Farrow D. An integrated, multifactorial approach to periodization for optimal performance in individual and team sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2018;13(5):538–561.
26. Neri M, & Caramiaux B. Markerless motion capture and recognition: The deep learning way. *Frontiers in Digital Humanities*. 2017;4:8.
27. Pappas IP, Paradisis GP, Christou DJ, & Zacharogiannis E. Quantitative analysis of human movement using wearable inertial sensors: A review. *Journal of Sports Science & Medicine*. 2015;14(3):587–599.
28. Pataky TC, Robinson MA, & Vanrenterghem, J. Vector field statistical analysis of kinematic and force trajectories. *Journal of Biomechanics*. 2013;46(14):2394–2401.
29. Ren S, He K, Girshick R, & Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*; 2015. 91–99.
30. Robertson GE, Caldwell GE, Hamill J, Kamen G, & Whittlesey SN. *Research methods in biomechanics* (2nd ed.). Human Kinetics; 2013.
31. Roetenberg D, Luinge H, & Slycke P. *Xsens MVN: Full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors*. Xsens White Paper; 2018.
32. Sabatini AM. Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing. *Sensors*. 2015;15(9):21812–21836.
33. Sabzevari R, Azami H, & Ostadabbas S. A comprehensive review of vision-based motion capture systems for body movements. *Journal of Medical Systems*. 2017;41(6):96. doi: 10.1007/s10916-017-0729-y.
34. Shull PB, Jirattigalachote W, & Hunt MA. Use of wearable sensors for understanding mechanical loading during physical activities. *Sports Medicine*. 2014;44(9):1265–1279.

35. Stöggli T, & Sperlich B. The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Frontiers in Physiology*. 2014;5:295.

36. Trojaniello D, Ravaschio A, Hausdorff JM, & Cereatti A. Comparative assessment of different methods for the estimation of gait temporal param-

eters using a single inertial sensor mounted on the lower trunk. *Gait & Posture*. 2015;42(4):581–585.

37. Wagner H, & Pfusterschmied J. Biomechanical aspects of skill acquisition in sport. *Kinesiology*. 2013;45(1):16–26.

38. Woollacott M, & Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: A review

of an emerging area of research. *Gait & Posture*. 2017;25(2):181–187.

39. Yang J, Luo S, & Zhou L. Wearable devices for sports: New integrated technologies allow a comprehensive understanding of sport activities. *IEEE Pulse*. 2015;6(6):40–49.

40. Zhang J, Wu X, et al. Unsupervised skeleton prediction for 3D human action recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*. 2018;40(12):2898–2912.

41. Zhang S, & Shah M. Human pose estimation in videos. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*; 2013. p. 3312–3319. doi: 10.1109/CVPR.2013.423.

42. Zitouni D, Chen S, Barakova E, & Markopoulos P. Markerless motion capture systems as coaching tools in gait rehabilitation: A systematic review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2016;13(1):1–16.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Жирнов Олександр Валерійович <https://orcid.org/0000-0002-2724-6225>, zhirnovs@ukr.net

Національний університет фізичного виховання і спорту України,
вул. Фізкультури 1, м. Київ, 03150, Україна

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhyrnov Oleksandr <https://orcid.org/0000-0002-2724-6225>, zhirnovs@ukr.net

National University of Ukraine on Physical Education and Sport
Fizkul'tury str. 1, Kyiv, 03150, Ukraine

Надійшла 26.07.2023