مقارنة وصفية لأنظمة مستشعرات القصور الذاتي كأداة للتصوير الحركي في رياضة الكاراتيه

ا.د / اسامة صلاح فؤاد
ا.م.د / عبد العزيز حسن عبد العزيز
د/ أحمد السيد عبد السلام
الباحث / عبد الله زنهم عبد الله

مستخلص البحث

يهدف هذا البحث إلى التعرف على أنسب نظام مستشعرات القصور الذاتي للباحثين من حيث ملائمته لبيئة العمل والاستخدام والسعر.

استخدم الباحث المنهج الوصفي؛ وعمل مسح مرجعي لبيانات عدد (٧) أنظمة تصوير حركي.

في ضوء إجراءات البحث وحدود عينة البحث تمكن الباحث من التوصل إلى:

- أن أنظمة التصوير الحركي التي يتم تثبيتها بأحزمة تثبيت تلائم عدد أكبر من المستخدمين على اختلاف قياساتهم الأنثروبومترية.
- الأنظمة التي تتصل ببعضها لا سلكياً تعد أفضل من مثيلاتها التي ترتبط ببعضها سلكياً أثناء الأداء.
- كلما زادت قيمة مقياس الجيروسكوب وكذلك مقياس التسارع لنظام التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي كلما أمكن قياس الحركات السريعة بدقة.
- يعد نظام Perception Neuron أفضل أنظمة التصوير الحركي بنظام مستشعرات القصور الذاتي.

في حدود عينة البحث وما توصل إليه الباحث من نتائج يوصي بـ:

- استخدام نظام Perception Neuron للتصوير الحركي في تتبع حركات الجسم البشري في الأنشطة الرياضية.
- عند محاولة اختيار نظام آخر يجب مراعاة بعض العوامل مثل:
  - طريقة معايرة النظام.
  - كيفية نقل البيانات إلى الحاسب الآلي.
  - اختيار الأنظمة ذات زمن الكمون الأقل.

Descriptive comparison for IMUs Systems as mocaping tool in Karate sport

Prof./ Osama Salah Fouad
Asistant Prof./ Abdelaziz Hassan Abdelaziz
Dr./ Ahmed Elsayed Abdelsalam
Researcher/ Abdalla Zenhom Abdalla

Abstract:

This Research aims to well Knowing the best IMU system according to its compatibility for working environment, way of use & price.

Researcher used Descriptive way surveying 7 Mocap systems.

According to research procedures and limits of research samples, researcher found that:

Mocap systems with straps is more suitable for larger number of anthropometric variety users.

Systems which connect wirelessly is better than wired connection ones.

Higher both gyroscope & accelerometer for IMU system is better for fast movement measuring accurately.

Perception neuron mocap system is the best mocap IMU system.

According to research results, researcher recommends that

Using Perception Neuron for human body motion tracing in PE.

When choosing another system should caring about:

System calibration.

Low latency system.

مقارنة وصفية لأنظمة مستشعرات القصور الذاتي كأداة للتصوير الحركي في رياضة الكاراتيه

ا.د / اسامة صلاح فؤاد
ا.م.د / عبد العزيز حسن عبد العزيز
د/ أحمد السيد عبد السلام
الباحث / عبد الله زنهم عبد الله

مقدمة ومشكلة البحث:

تمر الرياضة في الآونة الأخيرة بالعديد من مظاهر التطور في شتى المجالات من طرق ووسائل التدريب ووسائل وتكنولوجيا التعليم كذلك وسائل وأدوات القياس وأيضاً نظم التحليل الحركي وتتبع الحركات الرياضية.

ويذكر **ELINE VAN DER KRUK** و **MARCO M. REIJNE** (٢٠١٨) أن أبحاث الرياضة عادة ما تتطلب تصوير حركة الجسم البشري للرياضي؛ وتعد عملية تصوير حركة الجسم البشري هي عملية تسجيل الأداءات الحركية للجسم البشري. (٢: ٨٠٦)

والتصوير الحركي يشار إليه أيضاً باسم (mocap or mo-cap) وهو عملية تسجيل حركة الناس رقمياً ويتم استخدامه في المجال الرياضي للتحليل الحركي وكذا أيضاً الترفيه والتطبيقات الطبية وتطوير الألعاب وهي تشير أيضاً إلى تسجيل إجراءات الممثلين للرسوم المتحركة والمؤثرات المرئية. (٧)

كما تعد عملية تسجيل مواضع الجسم على شبكة الإحداثيات عملية صعبة جداً ومرهقة كما تطلب جهد كبير للاستحواذ على المعلومات وفقاً لدقة استخدام وسائل القياس، ووفقاً لتقارير المصنعين فيمكن تقسيم هذه الأنظمة بحسب الظروف والإعدادات إلى تصنيفات بحسب نوع البحث المؤدى والتي يمكن تصنيفها إلى أربعة تصنيفات.

أولاً: الأبحاث الرياضية التي تؤدى في ظروف غير معملية (ميدان – ملعب – ساحة ....) حيث يمارس النشاط؛ شأن أي بيئة خارج الضوابط المعملية فإنها تجلب العديد من التحديات؛ مثل الأماكن المختلفة (في الداخل – في الخارج)؛ الظروف المناخية (الحرارة – الرطوبة) العوامل التي تداخل مع وسائل القياس (التشتيت الضوضائي – الإضطرابات الكهرومغناطيسية) وكذلك العقبات في المكان والتي توثر على النتائج.

ثانياً: حجم عملية القياس (التصوير) الكبير؛ عادة تتناسب دقة القياس عكسياً مع الموضع المغطى من النظام (دقة أقل لحجم مقاس أكبر) وهو ما يجعله العامل المحدد عامة لاختيار نظام القياس؛ عندما تكون الإزاحة المقطوعة من اللاعب كبيرة فيتم استخدام الارجوميتر (الدراجة الثابتة) للحصول على عدد تكرارات الحركة على الرغم أنه أمر غير

مرغوب فيه عادة وذلك حيث أن الحركة على الأرجوميتر (الدراجة الثابتة) قد تختلف عن الحركة الأصلية أو لعدم توافر أرجوميتر (دراجة ثابتة) لاستنساخ الحركة.

ثالثاً: أبحاث تحليل الرياضة والتي تتعامل مع الأداءات السريعة جداً والتي هي أصعب في التصوير عن الأداءات الثابتة أو بطيئة الحركة (تحليل المشي)؛ على سبيل المثال تشكل ضرورة الترددات العالية للعينة تحدي تقني للتطبيقات الرياضية، العينة النموذجية للتردد تتراوح بين (٥٠ و ٢٥٠ هرتز) والتي لها التفضيل عن استخدام العينات ذات التردد العالي وذلك لتجنب الإقراط الكمي للبيانات الناتج عن الضوضاء للتردد؛ فقط في حالات خاصة يكوت التردد الأعلى من ١٠٠٠ هرتز ضروري مثل دراسة التصادم مثل الوثب أو الحركات ذات السرعات العالية جداً مثل كرة القاعدة؛ وعلاوة على ذلك يجب أن يتعامل النظام مع ديناميكية الحركة والذي على سبيل المثال يثبت أنه يمثل مشكلة لأنظمة القصور الذاتي حيث العجلة الخطية تمثل إزعاج لتقدير اتجاه المستشعر لخوارزميات اندماج المستشعرات.

رابعاً: حجم ووزن المستشعرات تمثل أهمية عندما يتطلب نظام القياس تثبيت مستشعرات أو علامات تتبع أو أجهزة إرسال واستقبال أو علامات مباشرة على جسم اللاعب؛ خاصة في حالات الآداءات العالية وشديدة الديناميكية يجب أن تؤدى بأقل قدر من الإعاقة لدرجات حرية الأداءات. (٢: ٨٠٦، ٨٠٧)

كما يذكر **Hai Li** و**Selina Khoo** و**Hwa Jen Yap** (٢٠٢٠) أنه بناءً على الخصائص التقنية المختلفة فإنه يمكن تقسيم تطبيق التصوير الحركي في المجال الرياضي إلى أربعة فئات:

نظام إلكتروني بصري (OMS): **Optoelectronic system**.

نظام كهرومغناطيسي (EMS): **Electromagnetic system**.

نظام معالجة الصور (IMS): **Image processing system**.

نظام قياس مستشعر القصور الذاتي (IMU): **Inertial sensor measurement system**.

في هذه التصنيفات الأربعة للتصوير الحركي النظام الإلكتروني البصري (OMS) يعد الأكثر دقة ويعتبر المعيار الذهبي في التقاط الحركة، ومع ذلك فإن النظام الإلكتروني البصري (OMS) يتطلب عدداً كبيراً من الكاميرات عالية الدقة وعالية السرعة والتي ستؤدي إلى القضايا المتعلقة بالتكلفة والتنسيق والاستخدام اليدوي، وعلاوة على ذلك فإن النظام الإلكتروني البصري (OMS) لن تستطيع تصوير الحركة في حالة حجب علامات التتبع، وقد حدثت أوجه القصور هذه من التطبيق العملي لاستخدام النظام الإلكتروني البصري (OMS) في المجال الرياضي.

ويمتاز النظام الكهرومغناطيسي (EMS) عن النظام الإلكتروني البصري (OMS) في أنه يمكنه قياس بيانات الحركة لنقطة معينة من الجسم بغض النظر عن حجب الرؤية؛ على الرغم من أن النظام الكهرومغناطيسي

(EMS) سريع التأثر بالموجات الكهرومغناطيسية في البيئة المحيطة والتي تشوه البيانات المسجلة كما أنه أيضاً يجب أن يظل في نطاق محدد من المحطة الأساسية والتي تحجم نطاق بيئة العمل. نظام معالجة الصور (IMS) يعتبر ذا دقة أكبر مقارنة بالنظام الكهرومغناطيسي (EMS) وأيضاً ذات مدى محسن بالنسبة للنظام الإلكتروني البصري (OMS)؛ بعض الدراسات استخدمت نظام معالجة صور (IMS) رخيص الثمن مثل Kinect device لتسجيل الحركات بغرض تحليلها في المجال الرياضي؛ على الرغم من أنه هناك بعض العيوب لأنظمة معالجة الصور (IMS) رخيصة الثمن والتي تُعنَى بقلة الدقة و عدم كفاية القدرة على التكيف مع البيئة والنطاق المحدود للحركة حيث أن مستشعر نظام Kinect لديه نطاق رؤية ضيق. أنظمة معالجة الصور (IMS) عالية الكفاءة ليس لديها مثل هذه النواقص؛ عامة أنظمة معالجة الصور (IMS) عالية الكفاءة لديها قدر ملائم من الدقة ونطاق جيد للقياس، على الرغم من أن أنظمة معالجة الصور (IMS) عالية الكفاءة تتطلب مستشعرات عالية الكلفة والكفاءة وأيضاً كامرات عالية السرعة والتي حجمت استخدامتها التطبيقية.

بناءً على عيوب أنظمة معالجة الصور (IMS) رخيصة الثمن في التطبيق في المجال الرياضي، فتطبيق نظام قياس الاستشعار بالقصور الذاتي (IMU) (لواقط الحركة تتكون من accelerometer "مقياس التسارع" – gyroscope "أداة تحديد الاتجاه" – magnetometer "مقياس المغناطيسية") في المجال الرياضي يمكن أن يخفف من هذه المشاكل التطبيقية.

في الآونة الأخيرة قلل التطور التكنولوجي سعر نظام قياس الاستشعار بالقصور الذاتي (IMU) متيحاً بذلك استخدامها في المجال الرياضي وقد تم إثبات صلاحيتها لتقييم دقة الحركة. (٣: ٢)

قام Poitras وأخرون (٢٠١٩) بإثبات معيار صحة استخدام أنظمة قياس الاستشعار بالقصور الذاتي (IMU) التجارية مثل (MVN Awinda system, Xsens) وذلك بمقارنته بنظام إلكتروني بصري (OMS) قياسي (Vicon).

بمقارنة نظام معالجة الصور (IMS) رخيص الثمن بنظام قياس الاستشعار بالقصور الذاتي (IMU) فيكون لنظام قياس الاستشعار بالقصور الذاتي (IMU) ميزات مؤكدة في القدرة على التكيف مع البيئة ونطاق حركة وافٍ؛ نظام قياس الاستشعار بالقصور الذاتي (IMU) لا يحتاج محطة أساس للعمل والذي يعني أنها أفضل نظام تصوير حركي متنقل متاح، وعلاوة على ذلك فإن نظام قياس الاستشعار بالقصور الذاتي (IMU) يمكنه قياس الحركات عالية السرعة وغير مقيدة للمستخدم مما يجعلها ملفتة للانتباه للاستخدام في المجال الرياضي. (٥: ٢)

ووفقاً لما تم ذكره سابقاً يمكننا التوصل إلى أن أنظمة التصوير الحركي باستخدام مستشعرات القصور الذاتي قد احتلت مرتبة متقدمة بين أنظمة تصوير ودراسة وتحليل الحركات الرياضية وذلك لتميزها بقدرتها على العمل في

البيئات المختلفة في داخل المبنى أو خارجه (“In Door – Out Door” environments) حيث أنها لا تحتاج لوجود كاميرات لتسجيل الحركة وبالتالي لا تتأثر بوجود عوائق للروئية أو البعد في مجال الرؤية للكاميرا كما أنها تغطي مساحات واسعة ولا تتاثر بتداخل الموجات بشكل كبير والمجالات المغناطيسية المحيطة بالبيئة ولا تتقيد بالبُعد لمسافات صغيرة عن المحطة الأساسية لها فهي تتغلب على عيب النطاقات المحدودة وبعد ثبوت فاعليتها وصلاحيتها للاستخدام في المجال الرياضي وأبحاث الرياضة وتميزها بإنخفاض أسعارها مقارنة بأنظمة التصوير الإلكتروني الضوئي وهو ما يجعلها مثالية للاستخدام في المجال الرياضي وابحاث الرياضة.

وحيث أن مهارات رياضة الكاراتيه تتسم بالسرعة العالية في حركات وصلات الجسم المختلفة وقطعها لإزاحات صغيرة في أزمنة متناهية الصغر مما يؤدي إلى سرعات عالية تحتاج لسرعة تردد عالية لتتبع مثل هذه الأداءات وهو ما لا يتوفر بسهولة في أنظمة تتبع الحركة ولا سيما الرخيصة منها؛ ونظراً لطبيعة رياضة الكاراتيه فإنه لا يمكن الحصول على بيانات تحليل حركي في ظروف الأداء العادية في الملعب وذلك لطبيعة الزي وصعوبة تجهيز اللاعب للأداء في الظروف العادية؛ ما يجعل من أنظمة التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي الحل الأمثل للعقبات التي تواجه القائمين على تدريب رياضة الكاراتيه لتتبع وتسجيل حركة الجسم البشري والأداء الرياضي للاعب الكاراتيه، ومن ثم الكشف عن عيوب الأداء.

ومن هنا تظهر مشكلة البحث مع تعدد المصنعين وتوافر أنظمة متعددة بأشكال مختلفة ونظم ربط وتشغيل مختلفة وكذلك تعدد أساليب التحضير والتشغيل فكان لزاماً على الباحث الإطلاع ومراجعة بيانات المصنعين للتوصل لأنسب أنظمة التصوير الحركي لاستخدامها في مجال تتبع الحركات الرياضية ومدى ملائمتها لبيئات العمل المختلفة والأنشطة الرياضية المختلفة كأداة لجمع البيانات في المجال الرياضي والتحليل الحركي.

هدف البحث:

يهدف البحث إلى التعرف على أنسب نظام مستشعرات القصور الذاتي للباحثين من حيث ملائمته لبيئة العمل والاستخدام والسعر.

تساؤلات البحث:

- ما هو أفضل نظام مستشعرات قصور ذاتي بالنسبة لبيئة العمل؟
- ما هو أفضل نظام مستشعرات قصور ذاتي من حيث سهولة التجهيز والإعداد؟
- ما هو أقل نظام مستشعرات قصور ذاتي من حيث الكلفة؟

تعاريف البحث:

التصوير الحركي: هو عملية ترجمة حركة الجسم البشري إلى عدد من الوسائط المختلفة مثل برامج التحليل الحركي وبرامج بناء المجسمات ثلاثية الأبعاد وألعاب الفيديو والأفلام، ولها العديد من الاستخدامات بدأ من التحليل الحركي وبناء المجسمات ثلاثية الأبعاد والتطبيقات الطبية وصولاً إلى تطبيقات علوم الروبوت والتطبيقات العسكرية. (٨)

التحليل البيوميكانيكي: هو الوسيلة المنطقية التي يجري بمقتضاها تناول الظاهرة موضع الدراسة كما لو كانت مقسمة إلى الأجزاء أو العناصر الأساسة المؤلفة لها حيث تبحث هذه الأجزاء كل على حدا تحقيقاً لفهم أعمق للظاهرة ككل. (١: ١٥)

الدراسات المرجعية:

جدول (١)

م	اسم الباحث	عنوان البحث	هدف البحث	المنهج	العينة	أهم النتائج
١	Hai Li Hwa Jen Yap Selina Khoo (٤)	Motion Classification and Features Recognition of a Traditional Chinese Sport (Baduanjin) Using Sampled-Based Methods	This study recognized the motions and assessed the motion accuracy of a traditional Chinese sport (Baduanjin), using the data from the inertial sensor measurement system (IMU) and sampled-based methods.	Descriptive	Fifty-three participants	using the extracted features of the motion data captained by IMU, that selecting an appropriate classifier can effectively recognize the motions and, hence, assess the motion accuracy of Baduanjin.
٢	Isabelle Poitras Mathieu Bielmann Alexandre Campeau-Lecours Catherine Mercier Laurent J. Bouyer Jean-Sébastien Roy (٥)	Validity of Wearable Sensors at the Shoulder Joint: Combining Wireless Electromyography Sensors and Inertial Measurement Units to Perform Physical Workplace Assessments	assess the concurrent validity of inertial measurement units (IMUs; MVN, Xsens) in comparison to a motion capture system (Vicon) during lifting tasks, and establish the discriminative validity of a wireless electromyography (EMG) system for the evaluation of muscle activity	Descriptive	Sixteen participants performed 12 simple tasks (shoulder flexion, abduction, scaption) and 16 complex lifting tasks (lifting crates of different weights at different heights)	wireless EMG and IMUs are valid units that can be used to measure physical demand in workplace assessments

م	اسم الباحث	عنوان البحث	هدف البحث	المنهج	العينة	أهم النتائج
٣	Eline van der Kruk Marco M. Reijne (٢)	Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review	assist researchers in the a suitable motion selection of capture system for their experimental set-up for sport applications	Descriptive	20 peer- reviewed studies on measurement accuracy, discussing 17 different human motion capture systems	An overview of 17 human motion capture systems is provided, reporting the general specifications given by the manufacturer (weight and size of the sensors, maximum capture volume, environmental feasibilities), and calibration specifications as determined in peer-reviewed studies. The accuracy of each system is plotted against the measurement range
٤	Xavier Robert‐Lachaine Hakim Mecheri Christian Larue André Plamondon (٦)	Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole‐body motion analysis		Descriptive	12 participants	IMUs accuracy was affected by the complex- ity and duration of the tasks. Nevertheless, technologi- cal error remained under 5° RMSE during handling tasks, which shows potential to track workers during their daily labour.

أوجه الاستفادة من الدراسات المرجعية:

قد ساعدت الدراسات المرجعية الباحث على تكوين صورة كاملة عن أنظمة التصوير الحركي المختلفة المستخدمة في المجال الرياضي؛ كذلك التعرف على مميزات وعيوب أنظمة التصوير الحركي ومدى ملائمة كل نوع لكل نشاط ممارس؛ كما ساعدت على فهم وتحديد المعايير المستخدمة في المقارنة بين أنظمة التصوير الحركي.

إجراءات البحث:

منهج البحث:

استخدم الباحث المنهج الوصفي، وذلك نظراً لملائمته لطبيعة البحث.

عينة البحث:

تمثلت عينة البحث في عدد (٧) أنظمة تصوير حركي من أصل (٨) أنظمة متعارف عليها في تتبع الحركة والتحليل الحركي للأداء الرياضي.

وسائل وأدوات جمع البيانات:

قام الباحث بإجراء مسح لأغلب مواقع المصنعين لمستشعرات القصور الذاتي التجارية وقام بعقد المقارنات من خلال البيانات المتاحة من المصنعين؛ كما هو موضح بجدول (٢).

جدول (٢)

	أبعاد المستشعر	نطاق مقياس التسارع	نطاق الجيروسكوب	الدقة	نظام الربط مع الكمبيوتر	تردد جهاز الإرسال والاستقبال	مصدر الطاقة	عمر البطارية	طريقة الشحن	حجم المُستقبِل	وزن المُستقبِل	الحد الأقصى لتوصيل المستشعرات للمُستقبل	زمن الكمون	أداء الترددات اللاسلكية	عدد المستشعرات لتتبع حركة الجسم ككل	طريقة التثبيت على الجسم	سعر نظام المستشعرات
Perception Neuron	(43*33*20)mm	(+/-)16 g	(+/-)2000 dps	0.02 g	ربط لا سلكي بواسطة لوحة وصل hub	2401 – 2480 MHz	بطارية داخلية للمستشعر	حوالي ٣ ساعات	علبة لشحن ١٧ مستشعر في وقت واحد	(80*47*13)mm	٣٠ جرام	17	<20ms	في الداخل من المركز ٧*٧ وفي الزاوية ١٠*١٠ م	17	نظام أحزمة	٣٥٠٠ دولار
X-Sense	–	–	–		ربط لا سلكي بواسطة Dongle هوائي	–	بطارية داخلية للمستشعر	٦ ساعات	شحن كوابل USB بالاضافة ل ٦ مخارج شحن USB	–	–	17	30ms	٢٠م	17	نظام أحزمة	٣٢٠٠٠ دولار

سعر نظام المستشعرات	١٢٤٥٠ دولار	٦٣٥٠ دولار بعد الخصم
طريقة التثبيت على الجسم	جاكت + أحزمة متنوعة مختلفة الأشكال بحسب الموضع على الجسم	بدلة مُحاكة ملتصقة بالجسم مختلفة المقاسات
عدد المستشعرات لتتبع حركة الجسم كاملا	١	
أداء الترددات اللاسلكية	حسب جودة ونوع الراوتر المستخدم	حسب نوع طريقة التوصيل
زمن الكمون	١	١
الحد الأقصى لتوصيل المستشعرات للمُستَقبل	55	١
وزن المُستَقبِل	١	١
حجم المُستَقبِل	١	main hub (35*8.7)mm wifi dongle (33*11.3)mm
طريقة الشحن	١	١
عمر البطارية	١	حسب نوع البطارية
مصدر الطاقة	بطاريات مقاس AA أو محول حائط ٥ فولت مستمر أو مُخَزِن طاقة	بطارية
تردد جهاز الارسال والاستقبال	١	تختلف بحسب نوع نظام الاقتران
نظام الربط مع الكمبيوتر	لا سلكي بشبكة wifi والمستشعرات مربوطة ببعضها بواسطة كابلات متجمعة في wifi hub tx	بلوتوث/ لا سلكي wifi/ كابل لتوصيل كارت التخزين
الدقة	١	١
نطاق الجيروسكوب	2000 dps	2000 dps(+/-)
نطاق مقياس التسارع	16 gs	8 g(+/-)
أبعاد المستشعر	(47*15*6)mm or (22*13*5)mm	١
	Synertial G4	Synertial G5

	أبعاد المستشعر	نطاق مقياس التسارع	نطاق الجيروسكوب	الدقة	نظام الربط مع الكمبيوتر	تردد جهاز الارسال والاستقبال	مصدر الطاقة	عمر البطارية	طريقة الشحن	حجم المُستقبِل	وزن المُستقبِل	الحد الأقصى لتوصيل المستشعرات للمُستقبِل	زمن الكمون	أداء الترددات اللاسلكية	عدد المستشعرات لتتبع حركة الجسم ككل	طريقة التثبيت على الجسم	سعر نظام المستشعرات
nansense	–	(+/–)16 g	(+/–)2000 dps	الحركات البطيئة ٠.٥ درجة والحركات السريعة ٠.٧ درجة	لا سلكي	1000 Hz	مُخَزن طاقة ٥ف/٢أ بطاقة استيعاب ١٣٠٠٠م/أ	١٠ ساعات	–	(100*75*25)mm	٢١٠ جرام	60	30ms	في الداخل ٤٥م وفي الخارج ٩٠م	22	بدلة مُحاكة	١٥٤٩٥ دولار
ultium motion	(44.5*33*12.2) mm	(+/–)200g	–	0.25/1.25	لا سلكي من خلال راوتر	2.4G h	بطارية داخلية للمستشعر	حوالي ١٠ ساعات	محطة شحن تتسع لـ٩ مستشعرات	(174*95*170) mm	–	16	–	–	15	لاصق أو أحزمة	٧٥٠٠٠ دولار
Rokoko	–	–	–	(+/–)1	لا سلكي من خلال راوتر	2.4 & 5Gh	مُخَزِن طاقة	–	–	–	–	9	15ms	حتى ١٠٠م		بدلة مُحاكة ذات أربعة مقاسات مختلفة	٢٧٤٥ دولار

مناقشة النتائج:

من خلال ما تم عرضه سابقاً تبين أن أنظمة التصوير الحركي من خلال مستشعرات القصور الذاتي أفضل من مثيلاتها الأخرى في عملية التصوير وتتبع الحركة وأنها ذات دقة عالية وهو ما جعلها واسعة الانتشار والاستخدام ومع تعدد هذه الأنظمة كان لابد من المفاضلة فيما بينها للوقوف على أنسبها وأفضلها للباحثين لآداء أبحاثهم في ظل ظروف بيئية مختلفة ومتنوعة وبدون معوقات للاستخدام أو ظروف خاصة وكذلك أن تكون إقتصادية حتى تمسي أفضل الاختيارات لعملية تتبع الحركة في الأبحاث اعلمية وذات جودة ودقة عالية؛ وعليه وبعد قيام الباحث بالمسح المرجعي لأغلب مواقع المصنعين والبالغ عددهم (٧) مصنعين لعدد (٨) أنظمة تمكن الباحث من مقارنة (٧) أنظمة منهم للوقوف على أنسبهم للاستخدام وذلك بعد استبعاد أحد الأنظمة وهو Wear Notch حيث أن هذا النظام يعمل من خلال الهواتف الذكية فقط والتي تعمل بنظام تشغيل Android فقط ويشترط توافر بيانات خلوية أو إنترنت حتى يتم تسجيل عملية التصوير الحركي ويتم تخزينها على الشبكة السحابية Cloud network وهم ما يمثل العديد من التحديات لبيئة العمل وشروط الاستخدام ويزيد من كلفة إجراء جلسة التصوير لذا فقد قام الباحث باستبعاد هذا النظام وقام بالمسح المرجعي لباقي الأنظمة الأخرى وبمراجعة العوامل التي قد تؤثر على بيئة العمل والاستخدام والاقتصادية للنظام فقد تمكن الباحث من تحديد هذه العوامل وهي:

١. طريقة ارتداء وتثبيت النظام على الجسم.
٢. طريقة ربط النظام ببعضه البعض اثناء التشغيل.
٣. طريقة ربط النظام بجهاز الحاسب الآلي.
٤. مصدر الطاقة المستخدم في النظام.
٥. السعر (الثمن المادي).

وبالنظر إلى العامل الأول فإننا نجد أن طريقة ارتداء وتثبيت مستشعرات القصور الذاتي على الجسم تئثر تأثيراً كبيراً على عملية القياس وفاعليته ففي حالة تثبيت المستشعرات بطريقة غير آمنة أو غير محكمة فقد يؤدي ذلك إلى إنفصال أحد تلك المستشعرات وعليها سيحدث إنفصال للشبكة المتكوَنة من النظام ككل وستؤدي إلى فشل النظام في الحصول على بياناته بصورة صحيحة وكذلك يجب أن يكون النظام فعال بعد تثبيته على الجسم حتى يتثنى استخدامه مع أفراد مختلفة فاختلاف القياسات الأنثروبومترية للجسم أو حتى طول الفرد أو أطوال وصلاته كذا محيط جسده أو محيط وصلاته وأيضاً الوزن الكلي للمؤدي لا يجب أن يمثل عائق لطريقة تثبيت مستشعرات النظام على الجسم فكلما كانت طريقة التثبيت أكثر فاعلية وملائمة لعدد أكبر من أجسام المؤدين كلما كان النظام أكثر فاعلية وأنسب للاستخدام.

وبعد مراجعة الباحث لبيانات المصنعين تبين وجود طريقتين لتثبيت مستشعرات النظام على الجسم وتمثلت في أن تكون إما في صورة بدلة مُحاكة (كامل الجسم – جاكت نصف علوي فقط) أو أن تكون مثبتة عن طريق أحزمة على وصلات الجسم؛ وبالنظر لهذين الأسلوبين وجد الباحث أن البدلة المُحاكة تصدر بمقاسات مختلفة لتتناسب مع أطوال وأوزان الموديين كما قام بعض المصنعين بتوفير دليل لمدى ملائمة كل قياس من الزي لطول ووزن محددين وهو ما يحد من فاعلية النظام حيث أنه يجب على المستخدم توفير القياسات المختلفة من الزي حتى يتم تثبيت المستشعرات عليها ومن ثم اتمام عملية القياس بصورة صحيحة حيث أنه في هذا النوع تكون أماكن المستشعرات مُفصَّلة داخل الزي وعليه يتحدد موقعها من الوصلة وطريقة القياس فعند ارتداء المؤدي لقياس غير مناسب له فبالتالي يؤدي إلى تغيير موضع المستشعر على الوصلة وبالتالي يكون القياس خاطئ حيث أن المستشعر يكون محدد موضع وجودة على الجسم ببعد معين من أطراف الوصلة؛ والجدير بالذكر أيضاً أن مثل هذه الأنظمة لا يكون السعر (الثمن) شامل كل هذه القياسات وإنما متضمن قياس واحد فقط أو إثنان على أقصى تقدير وفقاً لاختيارات الشاري ويتاح له شراء باقي القياسات مع دفع تكاليفها كاملة والتي تراوحت بين (٣٠٠ إلى ٩٥٠) دولار حسب المُصنِّع للقطة الإضافية الواحدة وهو ما يجعلها غير إقتصادية في مثل هذه الحالات نظراً لارتفاع القيمة ويحد من فاعليتها حال التغلب على مسألة ارتفاع القيمة وتحمل تلك النفقات فيجب على القائم بعملية القياس أو التصوير الحركي أن يقوم بمراجعة وتحديد ملائمة القياس للمؤدي قبل كل عملية تسجيل.

أما عن طريقة التثبيت بالأحزمة فتكون أكثر فاعلية حيث أن الأحزمة المعدة من قبل المصنعين تكون ملائمة للعديد من الأجسام كما أنه قد رُعيَّ في تصميم المستشعرات وطريقة تثبيتها وفقاً للمصنعين أنه يمكن استبدال هذه الأحزمة بأخرى تعد يدوياً من المستخدم بتكاليف بسيطة جداً وذلك لتلائم القياسات الفريدة والتي لا يمكن تغطيتها بالأحزمة المرفقة بالنظام وذلك حيث أن المستشعر إما يُثبَت على قاعدة وهي التي تحوي ممر تثبيت الحزام أو يكون موجود بالفعل كجزء من تصميم المستشعر وهو ما يجعل منه سهل الاستبدال للحزام في حالة وجود قياس متفرد لا يمكن تغطيته وكذلك وضع المستشعر بكل بساطة وسهولة ويسر على جسم المؤدي.

وهو ما يمثل أفضلية لأنظمة (Perception Neuron, X-sense & Ultium motion) عن باقي الأنظمة الأخرى في هذا المحور.

وبالنظر إلى العامل الثاني وهو طريقة ربط النظام ببعضه البعض؛ وهو بالأمر الهام حيث أن الشبكة المتكونة هي الجسم البشري وينتج عنها مجسم الشخص المؤدي وكذلك تبنى عليها عملية التتبع والقياس كاملة والحصول على نواتج العملية يكون من خلالها وأي انفصال في هذه الشبكة يؤدي إلى حدوث تشوه في البيانات المحُصّلَة وبالتالي تشوه أي نواتج تنتج عن هذا القياس (التسجيل).

ومن خلال بيانات المصنعين تبين للباحث وجود طريقتين لتكوين الشبكة في هذا الشأن ويكون من خلال الاتصال بين المستشعرات إما سلكياً أو لا سلكياً؛ وذلك من خلال ربط كل تلك المستشعرات ببعضها البعض من خلال أسلاك والتي تكون ذات طول ثابت وتكون هذه السلاك حرة التعليق حيث أن كل قيودها تتمثل في نقطتي الاتصال بكلا المستشعرين الواصلة بينهما وتكون حرة الحركة من الوسط وهو ما قد يؤدي ومع اختلاف قياسات الأجسام للمؤديين إلى فرض بعض القيود في الحركة على اللاعب مثل أن يكون اللاعب قصير القامة والسلك أطول بكثير من طول المسافة بين الوصلتين فيمثل عائقاً للحركة للاعب أو عبء إضافي للتحكم به والسيطرة عليه وهو ما قد يُلهيه عن أدائه الفعلي أو أن يكون مشدوداً جداً على اللاعب أثناء الأداء وهو ما يضيف إحساس بعدم الأريحية لدى المؤدي إضافة إلى كل ما سبق أنه يضيف وقت أكبر لعملية تجهيز اللاعب للقياس أو التصوير وكذلك عملية تجهيز النظام.

وعن الطريقة الأخرى وهي الاتصال لا سلكياً فهي تعتبر التكنولوجيا المفضلة للجميع في شتى مجالات الحياة وليست فقط في عملية التصوير الحركي حيث يميل الجميع للحرية في الحركة والاستخدام وعدم التقييد بوجود مواضع محددة للاجهز المستخدمة والتي يمكن التحكم بها لا سلكياً كذلك الأمر بالنسبة لطريقة الاتصال اللاسلكية في نظام التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي فعند اتصال المستشعرات ببعضها وبالنظام لا سكلياً تعطي للمؤدي الكثير من الحرية لا تفرض عليه قيود أثناء الأداء فيكون شغله الشاغل هو أدائه الشخصي وليس ما يحمله على جسده وهو ما يعطي أفضلية من حيث حرية الحركة للارتباط اللاسكلي عنن الارتباط السكلي.

وهو ما يعطي أفضلية وتمايز لأنظمة (Perception Neuron, X-sense & Ultium motion) عن باقي نظرائهم.

بعد تجهيز اللاعب للآداء وتكون شبكة الربط بين مستشعرات القصور الذاتي تأتي العملية الرئيسية والتي يسعى لها المستخدم وهي عملية تسجيل ونقل البيانات من مستشعرات القصور الذاتي إلى النظام وتسجيلها على الحاسب اللآلي وهنتا يبرز دور العامل الثالث في التقييم وهو وسيلة الربط بين المستشعرات وجهاز الحاسب الآلي والمتمثلة في عملية نقل البيانات وهنا تتعدد وتتنوع الوسائل إلا أنها جميعا تتفق في كونها عملية لاسلكية ولكن باستخدام تقنيات مختلفة وقبل استعراض هذه السبل فلابد من توضيح هذه التقنيات والتي تتمثل في ثلاث صور وهي (Bluetooth – Wifi – wifi usb hub) .

وكما تم توضيحه سابقاً أن هذه التقنيات تتفق جميعاً في كونها لا سلكية الاتصال إلا أنها يوجد بينها وبين بعضها البعض القليل من الاختلاف حيث أن النوع الأول وهو نظام Bluetooth وهو ابسط صور الاتصال اللاسلكي يتمثل في أنه الآلية المبسطة للربط بين جهازين مختلفين لا سلكياً ولا يحتاج لكلمة سر للربط بينهم

ويستخدم نظام الموجات الصوتية للربط بين هذين الجهازين ويكون في مدى صغير ويعتبر غير آمن في حالة الاتصال؛ أما عن نظام Wifi فهو يعد تطور أفضل لصورة النقل اللاسلكي حيث يتوجب لتكوينه وجود جهاز (Router or Switch) وذلك بغرض تكوين الإشارة اللاسلكية للربط بين عدة أجهزة على الشبكة ويتوجب لدخول هذه الشبكة إدخال كلمة سر للدخول على هذه الشبكة وتبادل البيانات بين الأجهزة المتصلة وبعضها البعض كما أنه تمتاز بكونها ذات مدى كبير جداً وفقاً لنوع الموجات الصادرة عن الجهاز ونوع التردد المستخدم وهو ما يحدد مدى التغطية للشبكة، وصولاً إلى النوع الثالث والأخير والذي يمثل تطوراً آخر في أنظمة الربط اللاسلكي وهو المسئول عن إنشاء شبكة لا سلكية مخصصة بين نظامين ويكون من خلال مدخل USB الخاص بالجهاز والذي يقوم بتحويل الإشارة من مدخل الـ USB إلى إشارة لاسلكية للربط مع جهاز آخر أ, نظام آخر ويكون مرتبط بهذا الـ USB HUB وذلك لتكوين شبكة مغلقة بين الجهازين فقط ولا يجوز الدخول عليها من أي جهاز آخر وترتبط بدون إدخال رقم سري ومدى هذا النوع من الاتصال يختلف باختلاف نوع الـ USB HUB المستخدم وتعد هذه الوسيلة هي من أغلى الوسائل لتكوين الشبكات وأكثرها أمانا.[١٦–١٨] وبعد ما تم ذكره عن نوع وجودة تكوين الاتصال اللاسلكي فلابد من الأخذ في الاعتبار بعض الاعتبارات الواجب مراعاتها فيما يخص العمل في مجال التصوير الحركي حيث أن أحد أسباب تفضيل أنظمة التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي كانت هي ملائمتها لجميع البيئات والظروف وإمكانية استخدامها في داخل المبنى أو خارجه وعليه فإن إسلوب عملها واتصالها يعد عامل حاسم وقوي لتحديد جودة النظام ومن خلال المسح المرجعي وبيانات المصنعين تبين أنه يمكن ربط هذه الأنظمة لا سلكيا من خلال التقنيات سالفة الذكر وتعد أفضل تغطية هي لنظامي Wifi و Usb Hub/ station ولكن نظام wifi يعد به أحد العيوب على الرغم من كونه نظام فعال وذو مدى كبير بحسب نوع الـ Router المستخدم في تكوين الشبكة ألا وهو ضرورة توفير مصدر للطاقة لتشغيل هذا النظام وعليه فإن الأنظمة التي تعتمد على Router للتشغيل تتعرض للتهديد حيال استخدامها في الخارج إلا في حالة توافر مصدر للطاقة في نطاق التسجيل وهو ما يعطي أفضلية لنظامي (Perception Neuron & X–sense) عن باقي الأنظمة التي تعمل بنظام Router في حالة عدم توافر مصدر طاقة كهربية في بيئة العمل.

بعد الإنتهاء من وضع النظام وتثبيته على اللاعب/ المؤدي تأتي عملية تشغيل النظام في الصدارة وكيفية عمله وهو ما يقودنا إلى مصدر الطاقة في النظام نفسه حتى تعمل المستشعرات بكفاءة وتقوم بتوصيل الإشارة ونقل البيانات بكفاءة وصورة صحيحة فيجب أن يحوي النظام المثبت على جسم اللاعب مصدر لتوصيل الطاقة للمستشعرات وبمراجعة بيانات المصنعين نجد أنه توافرت عدة مصادر للطاقة إلا أنها اتفقت أن تكون تحت أحد

شكلين إما أن يكون مصدر داخلي (أي مثبت داخل المستشعر) أو مصدر خارجي (أي مثبت على جسم المؤدي ومتصل بالنظام)

وهو الأمر الذي سيقودنا إلى المحورين الأول والثاني اللذان تم مناقشتهما سابقاً وعن حرية الآداء للاعب وهو ما سيضعنا أمام فكرة انفصال مصدر الطاقة أثناء الأداء من على الجسم أو إعاقته لحركة اللاعب حالة كونه مصدر خارجي؛ وبالتالي فهي تعد ميزة لنظم التصوير الحركي والتي تحوي مستشعراتها على بطارية داخلية (مصدر داخلي للطاقة) حيث أنه يكون ضمن وحدة المستشعر ويكون تزويده بالطاقة داخليا ويمكن الاستدلال عليه من خلال النظام.

وهو ما يعد نقطة تمايز لأنظمة (Perception Neuron, X-sense, Synertial G5 & Ultium motion) لاحتوائها على مصادر طاقة داخلية.

من خلال ما سبق عرضه نجد تصدراً وتميزاً لثلاثة أنظمة في كل المحاور سالفة الذكر وهم (Perception Neuron, X-sense & Ultium motion) ولا يبقى إلا محوراً واحداً هاماً جداً بل وقد يكون حاسماً لأغلب الباحثين وهو العامل الإقتصادي حيث يمثل سعر النظام عتبةً فارقةً لدى الباحثين وكما ذكر **Hai Li** و **Selina Khoo** و**Hwa Jen Yap** (٢٠٢٠) أن التطور في صناعة أنظمة مستشعرات القصور الذاتي جعل أسعارها رخيصة جداً مقارنة بأنظمة التصوير الإلكتروني الضوئي وأنها ذات دقة عالية (٣) وكما هو موضح بجدول (٢) فإننا نجد أن نظام Ultium motion قد احتل المرتبة الثالثة من حيث انخفاض السعر يسبقه في المرتبة الثانية نظام X-sense ويتصدر القائمة من حيث الأقل سعراً هو نظام Perception Neuron للتصوير الحركي.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

في ضوء المعلومات التي توافرت للباحث ومراجعة وتحليل وعرض البيانات تمكن الباحث من الوصول للاستنتاجات التالية:

- يمكن استخدام أنظمة التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي في بيئات متعددة أكثر من الأنظمة الأخرى.
- تمتاز أنظمة التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي بقدرتها على تتبع الحركة بدقة أعلى من الأنظمة الأخرى.
- أنظمة التصوير الحركي التي يتم تثبيتها بأحزمة تثبيت تلائم عدد أكبر من المستخدمين على اختلاف قياساتهم الأنثروبومترية.

- يمكن ربط أنظمة التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي بأجهزة الحاسب الآلي بعدة طرق مثل (تقنية Dongle –Hub – wifi – Bluetooth).
- يمكن ربط مستشعرات القصور الذاتي لنظام التصوير الحركي ببعضها سلكياً أو لا سلكياً.
- الأنظمة التي تتصل ببعضها لا سلكياً تعد أفضل من مثيلاتها التي ترتبط ببعضها سلكياً أثناء الأداء.
- في حالة ربط مستشعرات القصور الذاتي لنظام تصوير حركي فلابد من توافر مصدر للطاقة للنظام وكذلك موصل لبيانات النظام؛ ويجب تثبيتهم بإحكام على الجسم أثناء الأداء.
- كلما زادت قيمة مقياس الجيروسكوب وكذلك مقياس التسارع لنظام التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي كلما أمكن قياس الحركات السريعة بدقة.
- تمتاز أنظمة التصوير الحركي بمستشعرات القصور الذاتي بدقة أكبر من الأنظمة الكهرومغناطيسية وذلك لضعف تأثرها بالموجات الكهرومغناطيسية بفضل وجود مقياس الجيروسكوب والذي يساعد على تحديد اتجاه الشمال المغناطيسي.
- يعد نظام Perception Neuron أفضل أنظمة التصوير الحركي بنظام مستشعرات القصور الذاتي.

التوصيات:

في ضوء إجراءات البحث والنتائج والاستنتاجات التي توصل لها الباحث؛ يوصي الباحث بـ:

- استخدام نظام Perception Neuron للتصوير الحركي في تتبع حركات الجسم البشري في الأنشطة الرياضية.
- عند مفاضلة الباحثين بين أنظمة أخرى تظهر بخلاف المذكورة في البحث يجب على الباحثين مراعاة عدة عوامل عند الاختيار وليست السعر فقط وهي:
- طريقة معايرة النظام.
- كيفية ربط النظام بالحاسب الآلي والمساحة التي يمكن تغطيتها به.
- اختيار الأنظمة التي يمكن استخدامها دون الحاجة لمصادر تيار خارجية لربطها بالحاسب الآلي.
- اختيار الأنظمة التي ترتبط مستشعراتها فيما بينها لا سلكياً.
- اختيار الأنظمة ذات زمن الكمون الأقل.
- اختيار الأنظمة التي تكون مزودة مستشعراتها بمصدر للطاقة داخلي.

المراجع

[1] الدين .ع.م.ج, دراسات معملية في بيوميكانيك الحركات الرياضية, دار المعارف, الإسكندرية, n.d.

[2] E. van der Kruk, M.M. Reijne, Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review, European Journal of Sport Science. 18 (2018) 806–819.

[3] H. Li, S. Khoo, H.J. Yap, Differences in motion accuracy of Baduanjin between novice and senior students on inertial sensor measurement systems, Sensors (Switzerland). 20 (2020) 1–23.

[4] H. Li, H.J. Yap, S. Khoo, Motion classification and features recognition of a traditional chinese sport (Baduanjin) using sampled-based methods, Applied Sciences (Switzerland). 11 (2021).

[5] I. Poitras, M. Bielmann, A. Campeau-Lecours, C. Mercier, L.J. Bouyer, J.S. Roy, Validity of wearable sensors at the shoulder joint: Combining wireless electromyography sensors and inertial measurement units to perform physical workplace assessments, Sensors (Switzerland). 19 (2019).

[6] X. Robert-Lachaine, H. Mecheri, · Christian Larue, A. Plamondon, Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis, Med Biol Eng Comput. 55 (2017) 609–619.

[7] Motion Capture, (n.d.).

[8] MOCAP 101: What is Motion Capture? | Perception Neuron Motion Capture, (n.d.).

[9] Compare Xsens MVN Hardware - Awinda Starter, (n.d.).

[10] G4 MOCAPSUIT | Custom-made Motion Capture Suit | AiQ Synertial, (n.d.).

[11] Ultium Motion | Noraxon USA, (n.d.).

[12] Smartsuit-Pro Tech specs, (n.d.).

[13] PN Pro Landing Page | Perception Neuron Motion Capture, (n.d.).

[14] G5 MOCAPSUIT | Motion Capture Suit With GPS | AiQ Synertial, (n.d.).

[15] NANSENSE - PROFESSIONAL INERTIAL MOTION CAPTURE SYSTEMS, (n.d.).

[16] Differences between Wireless and Bluetooth, (n.d.).

[17] What's the Difference Between Wireless Access Points, Hubs, Switches, and Routers? | FiberPlus Inc, (n.d.).

[18] Wireless USB Hub | How to extend USB over WiFi [2 ways], (n.d.).