

버추얼 프로덕션을 위한 IMU 모션캡처 정확도와 활용에 대한 고찰

A Study on the Accuracy and Application of IMU Motion Capture for Virtual Production

주 저 자 : 최혁재 (Choi, Hyuk Jae)

동아방송예술대학교 디지털영상디자인과 교수
hjchoi@dima.ac.kr

공 동 저 자 : 김지영 (Kim, Ji Young)

한양대학교 에리카 공학대학 지능형 로봇공학과 교수

<https://doi.org/10.46248/kidrs.2024.3.294>

접수일 2024. 08. 22. / 심사완료일 2024. 09. 02. / 게재확정일 2024. 09. 09. / 게재일 2024. 09. 30.

Abstract

IMU-based motion capture systems are gaining attention as a low-cost, easy-to-install alternative to Optical Motion Capture (OMC) due to their wide capture volume. This study analyzes the technical features of IMU systems and compares their accuracy with OMC, reviewing correction techniques to address magnetic interference and sensor drift. Six prior studies showed that post-correction accuracy had an RMSE of 0.3-7.2, with sports movements achieving 79.32-100% accuracy. IMU systems are advantageous for real-time processing and live performance, making them valuable in virtual production. However, they have limitations in precise motion capture, such as facial capture, requiring hybrid system support and further technological advancements.

Keyword

Motion capture(모션캡처), IMU(관성측정장치), OMC(광학식모션캡처)

요약

IMU(관성측정장치) 기반의 모션캡처 시스템은 저비용, 설치의 간편성, 넓은 캡처볼륨 등의 장점으로 광학식 모션캡처(OMC)의 대안으로 주목받고 있다. 본 연구는 IMU 시스템의 기술적 특성과 기존 광학식 모션캡처 시스템의 장단점을 분석하였으며, 선행연구 분석을 통해 광학식 모션캡처와의 동작 정확성을 비교하고 자력간섭과 센서 드리프트 문제를 해결하기 위한 다양한 보정 기법을 검토하였다. 6개의 선행연구에 따르면 보정 후 정확도는 RMSE 0.3-7.2 수치로 신뢰할만한 수치를 기록했으며, 스포츠 동작은 79.32-100%로 높은 정확도를 나타냈다. 또한 IMU 모션캡처 시스템이 실시간 데이터 처리와 라이브 퍼포먼스에 강점을 지니고 있어 버추얼 프로덕션 분야에서 유용하게 활용될 수 있음을 제시하고 있다. 그러나 페이스 캡처 등 정밀한 움직임 인식에 한계가 있어 하이브리드 시스템의 보조가 필요하며 기술적 과제를 해결하기 위한 지속적 발전이 요구된다.

목차

1. 서론

- 1-1. 연구 배경 및 목적
- 1-2. 연구 방법

2. 이론적 배경

- 2-1. 모션캡처 시스템 타입
- 2-2. IMU방식 모션캡처 특성

3. IMU 모션캡처 선행연구 분석

3-1. 연구 사례

3-2. 선행 연구결과 분석

3-3. 한계

4. 버추얼 프로덕션 활용을 위한 요소 고찰

- 4-1. 버추얼 프로덕션과 모션캡처 시스템
- 4-2. IMU시스템의 버추얼 프로덕션 고려 요소

5. 결론

참고문헌

1. 서론

1-1. 연구의 배경 및 목적

모션캡처(Motion Capture) 기술은 인간의 움직임을 디지털 데이터로 변환하여 다양한 디지털 환경에서 사용할 수 있게 하는 기술로 영화, 게임, 애니메이션, 스포츠, 재활 치료 등 다양한 분야에서 필수적인 도구로 자리 잡아 왔다. 모션캡처는 초기에는 주로 영화와 게임 산업에서 캐릭터 애니메이션을 위한 도구로 개발되었으나, 최근에는 가상 현실(VR), 증강 현실(AR), 메타버스 등의 발전과 함께 그 활용 범위가 크게 확장되고 있다. 이러한 모션캡처 시스템은 크게 광학식 모션캡처와 비광학식 모션캡처로 나눌 수 있으며, 각각의 기술은 나름의 장단점을 가지고 있어 사용자의 목적과 환경에 따라 최적의 시스템을 선택하는 것이 중요하다.

모션캡처의 역사는 1980년대 초반으로 거슬러 올라가며, 당시에는 주로 광학식 모션캡처 시스템이 사용되었다. 광학식 모션캡처 시스템은 카메라를 이용해 반사 마커의 위치를 추적하여 움직임을 기록하는 방식으로, 높은 정확도와 정밀도를 자랑한다. 그러나 이러한 시스템은 고가의 장비와 넓은 공간을 필요로 하며, 설치와 운영이 복잡하다는 단점이 있다. 반면, 최근에는 비광학식의 관성식 모션캡처 시스템이 주목받고 있다. 관성식 모션캡처는 자이로스코프, 가속도계, 자력계 등의 센서를 기반으로 동작을 추적하는 방식으로, 장비가 간소하고 설치가 간편하며, 상대적으로 저비용으로 시스템을 구축할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 관성식 모션캡처는 광학식 모션캡처에 비해 정확도가 낮고, 센서의 드리프트(drift) 현상으로 인해 장시간 사용 시 오차가 발생할 수 있다는 단점이 존재한다.

최근 모션캡처 기술은 가상 현실과 증강 현실을 포함한 다양한 디지털 환경에서의 활용을 위해 빠르게 발전하고 있으며, 특히 인공지능(AI)과의 결합을 통해 더욱 정교하고 실시간으로 데이터를 처리할 수 있는 기술들이 등장하고 있다. 이러한 발전은 영화, 게임, 애니메이션 산업뿐만 아니라 스포츠와 재활 치료와 같은 분야에서도 모션캡처의 활용을 가능하게 하며, 각 분야에 적합한 최적의 모션캡처 플랫폼을 선택하는 것이 점점 더 중요해지고 있다.

본 연구의 목적은 이러한 배경에서 광학식 모션캡처와 관성식 모션캡처의 장단점을 비교 분석함으로써, 영화, 게임, 애니메이션, 스포츠, 엔터테인먼트 등 다양한 분야에서 적합한 모션캡처 플랫폼을 선택하는 데 도움을 주고자 한다. 또한, 관성식 모션캡처 시스템이 광학식에 비해 비용 효율적이라는 점을 고려하여, 저비용으

로 구축 가능한 관성식 모션캡처의 장단점을 고찰함으로써, 향후 XR콘텐츠, 디지털휴먼, 라이브퍼포먼스 등의 버추얼 프로덕션에 활용할 수 있는 방안과 함께 모션캡처 시스템의 미래를 예측하고자 한다.

1-2. 연구 방법

본 연구에서는 관성식 모션캡처 시스템의 다양한 방식들(X-sense, Rokoko, Perception Neuron Studio 등)을 비교 분석하고, 이들 시스템의 구축 비용, 비교 우위, 그리고 잠재적인 문제점들을 고찰할 것이다. 또한, 관성식 모션캡처의 정확도를 데이터 실험으로 연구한 선행연구사례들을 분석하여, 관성식 시스템의 신뢰성과 한계에 대해 논의할 예정이다. 마지막으로, 관성식 모션캡처가 버추얼 프로덕션(Virtual Production) 분야에서 어떻게 활용될 수 있을지를 광학식 모션캡처 시스템과 비교해 고찰함으로써, 해당 기술의 실제 응용 가능성을 평가할 것이다.

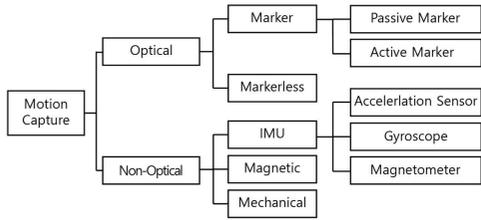
이 연구는 다양한 모션캡처 플랫폼의 특성과 성능을 종합적으로 분석하여, 각 분야에서 최적의 플랫폼을 선택하는 데 유용한 정보를 제공함과 동시에, 향후 모션캡처 기술의 발전 방향에 대한 통찰을 제공할 것이다.

2. 이론적 배경

2-1. 모션캡처 시스템 타입

모션캡처 시스템은 카메라 사용 여부에 따라 광학식(Optical)과 비광학식(Non-optical)으로 일차적으로 구분되며, 여기에 마커의 사용 여부에 따라 마커식(Marker)과 비마커식(Markerless)으로 구분된다. 비광학식 모션캡처는 다시 관성측정장치(IMU)¹⁾를 사용한 관성식 모션캡처, 자기를 사용한 자기식(Magnetic) 모션캡처, 기계식(Mechanical) 모션캡처로 분류되는데 자기식과 기계식으로 정확도가 떨어지고 오류가 많아 정확도 면에서는 광학식, 범용성 면에서 관성식에 밀려 현재는 거의 사용되지 않는다.

1) IMU(Inertial Measurement Unit) :이동물체의 속도와 방향, 중력, 가속도를 측정하는 장치를 뜻하며, 센서 기반 방식이다. IMU 기반의 위치추정은 가속도계, 각속도계, 자자기계 및 고도계를 이용하여 보행자 및 이동물체의 움직임 상황을 인식하는 방식
[네이버 지식백과] IMU [Inertial Measurement Unit] - 관성(慣性) 측정장치 (지형 공간정보체계 용어사전, 2016. 1. 3., 이강원, 손호웅)



[그림 1] 모션캡처 시스템 분류

마커 기반 광학식 모션캡처는 모션캡처용 특수 광학식 카메라를 이용하여 반사 마커(passive) 또는 LED 마커(active)의 움직임을 삼각측량 기법으로 추적하는 방식으로 매우 높은 정확성을 가지고 있어 주로 영화나 게임 등 높은 품질의 결과물을 필요로 할 때 사용된다. 손가락과 얼굴같은 작은 움직임도 정확하게 추적하고 넓은 공간에서 여러 피사체를 동시에 추적할 수 있지만 장비와 유지보수 비용이 높고 최소 12개에서 수십 개 이상의 카메라가 설치된 실내환경에서만 추적할 수 있다는 제약이 있다. 마커리스 광학식 모션캡처는 카메라 비전과 시를 사용해 마커 없이 신체 움직임을 추적하는 방식으로 마커나 슈트가 필요 없어 액터의 자연스러운 움직임이 가능하고 실외나 실내 다양한 환경에서 사용이 가능하며, 하드웨어 비용이 저렴해 비용 절감이 가능하다. 하지만 정확도가 떨어지고 손가락이나 작은 제스처 등 섬세한 동작의 추적이 어려우며 떨어지는 정확도로 인해 대규모 보정작업이 필요하다는 단점이 있다. 하지만 인공지능 알고리즘을 사용하여 움직임을 분석하고 추적하기 때문에 계속 기술이 발전하고 있으며 실시간 추적, 강력한 소프트웨어 지원으로 버추얼 프로덕션, 엔터테인먼트, 스포츠과학, 의료, VR/AR 등 다양한 응용 분야에서 활용도가 점차 증가하고 있다.



[그림 2] 'Optitrack' Motion Capture(2)

비광학식 모션캡처는 초기에 저렴한 비용으로 전용 스튜디오 없이 움직임을 추적할 수 있는 자기식과 기계식 모션캡처 시스템이 소규모산업에서 사용되었으나 둘 다 움직임이 제한적이고 정확도가 떨어지는 단점이

2) <https://optitrack.com/applications/movement-science-s>, 2024.08.01.

있다. 자기식 모션캡처는 센서의 송신기에서 생성된 저주파 자기장을 측정하여 인체의 움직임을 감지하고 6-11개 이상의 움직임과 회전, 위치정보를 제공하는 센서를 사용한다. 기계식 모션캡처보다 많은 자유도를 가지지만 주변의 금속 물질에 간섭을 받으며 거리가 너무 가까워지는 경우 정확한 측정이 어렵고 센서 간 간섭이 있을 수 있어 움직임의 범위가 광학식 모션캡처와 비교해 작다.³⁾ 기계식 모션캡처는 인체의 움직임을 감지할 수 있는 외골격(exoskeleton)이나 기계적 링크를 사용해 관절 각도와 움직임을 측정하는데, 자기장이나 가림에 영향을 받지 않지만, 물리적 장치로 인해 움직임을 제한하고 불편하며 세부적인 움직임을 제공하지 않는 단점이 있다. 관성측정장치인 IMU : 가속도 센서(accelerometer)와 각속도(angular velocity) 센서(자이로스코프), 지자기센서(magnetometer)를 동시에 사용해 움직임을 추적하는 관성식 모션캡처는 빛의 간섭을 받지 않고 실내, 실외 다양한 위치에서 모두 추적이 가능하며, 광학식 마커기반 모션캡처 시스템 대비 기기 비용이 저렴하며 휴대성이 뛰어나 최근 다양한 분야에서 많이 사용되고 있다. 하지만 광학식에 비해 정밀한 움직임 추적에 한계가 있어 영화나 게임 같은 고정밀 데이터에는 사용이 제한적이고 스포츠 분석, 재활 치료, 버추얼 프로덕션 등 이동성과 실시간 피드백이 중요한 분야에서 점차 유용하게 사용되고 있다. 이러한 모션캡처 시스템의 분류에 따른 특성과 장단점을 비교하여 모션캡처 움직임의 정밀함 오류에 따른 정밀도, 캡처 대상이 움직일 수 있는 공간의 제약인 캡처 볼륨, 모션캡처 움직임을 추적할 수 있는 장소와 환경적 제약을 고려한 접근성, 다양한 산업에 활용할 수 있는 활용도, 구축 비용을 고려한 비용적 측면에서 비교했을 때 다음과 같이 분류하였다.

[표 1] 모션캡처 시스템 별 특성 비교

분류	마커식	마커리스식	관성식	자기식	기계식
정밀도	매우 높음	매우 낮음	중간-점층적하락	중간	낮음 움직임 제한
캡처 볼륨	높음 비용 증가	중간	매우 높음	매우 낮음	낮음
접근성	매우낮음 많은 카	높음 스튜디오	높음 일부 제약	낮음 자기장 왜곡	높음 주변 환경

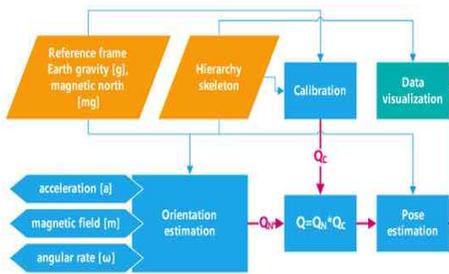
3) 임우택, 모션 캡처 시스템에 대한 고찰: 임상적 활용 및 운동형상학적 변인측정 중심으로, 한국전문물리치료학회지 29권 2호, 2022, p. 90.

	메라 필요	불필요		민감	제약x
활용 분야	영화, 애니메이션 등	게임, 소규모 산업	스포츠, 엔터, XR	특정 산업 분야	실측 데이터 필요 산업
비용	매우 높음	비교적 낮음	낮음	매우 낮음	매우 낮음

2-2. IMU방식 모션캡처 특성

2-2-1. IMU방식 모션캡처 원리

IMU방식 모션캡처는 가속도 센서와 자이로센서를 융합한 동작센서 모듈을 사용하며 경우에 따라 자력 센서를 같이 사용하기도 한다. 자이로스코프에서 측정된 각속도를 통합하면 로컬 프레임에서 초기 방향을 기준으로 각 시간 지점에서 센서의 방향 추정이 제공되고 가속도계는 중력에 의한 가속도와 센서가 부착된 물체의 움직임에 의해 발생하는 가속도를 측정한다. 자기 센서는 자기장을 감지하여 방위를 측정하며 절대 방향 참조를 제공하고 움직임의 오차를 보정하는데 사용된다.⁵⁾



[그림 3] IMU 모션캡처 데이터처리 파이프라인⁴⁾

관성식 모션캡처 시스템은 인간의 동작 및 자세 인식을 위한 센서를 장착한 웨어러블 수트를 착용해 동작을 감지한다. 이 센서는 전통적인 실리콘 기반 센서로서 가속도계, 자이로스코프, 자력계, 3가지 센서를 사용한다. 가속도계(accelerometer)는 물체의 가속도를 측정할 수 있는 장치로 질량 블록, 댐퍼, 탄성 소자, 감지 소자, 적응 회로 등으로 구성되고, 측정 원리에 따라 각(Angular) 가속도계와 선형(Linear) 가속도계를

분류된다. x, y, z축 3축 가속도계를 통해 정확한 동작을 구별하며, 정확도는 +2g이내, 샘플링 속도는 50-100Hz 이내이며, 현재 시스템에서는 3축 가속도계를 인체의 팔다리과 허리에 부착하는 경우가 많다.⁶⁾ 자이로스코프는 코리올리 힘을 기반으로 각 분산 또는 각 속도를 측정하는 센서이다. 고속에서 회전의 각속도를 측정할 수 있으며 가속도계와 함께 사용해 오류를 줄이고 모니터링 정확도를 높이고 있다. 하지만 장시간 사용하면 무작위 드리프트의 영향을 받아 오류가 발생하는데 이는 관성식 모션캡처의 사용시간이 길어질수록 정밀도가 하락하는 문제점을 발생시킨다. 샘플링 속도는 일반적으로 100Hz로 사용되며 주로 팔과 몸통의 각속도 모니터링에 사용된다. 자력계(magnetometer)는 지구 자기장을 사용하여 움직임을 감지하며 가속도계와 자이로스코프와 함께 사용하여 자이로스코프 오류로 인한 헤딩 각도 오프셋을 수정하고 자세 모니터링의 정확도를 향상시키는 관성측정장치로 사용되는 경우가 많다.⁷⁾ 하지만 자력계를 사용하는 경우 금속성 물체나 자력이 있는 물체가 있는 장소에서 사용이 어려워 환경적 제약이 뒤따른다. 이러한 3가지 센서를 사용한 관성감지장치(IMU)는 크기가 작고 비용이 저렴하며 3차원 관절 각도를 높은 정확도로 측정할 수 있기 때문에 최근 다양한 분야에 사용도가 증가하고 있다.

2-2-2. IMU방식 모션캡처 제원 비교

관성식 모션캡처 시스템은 상용화된 제품 외에도 스포츠과학, 의학, 재활 치료 등을 위한 웨어러블 모션캡처 장비를 개발하여 사용하는 경우가 많으며, 여기서는 상용화 제품 중 버추얼프로덕션, 엔터테인먼트 분야에서 가장 많이 사용되는 장비를 분석 군에 포함하였다. 먼저 Xsens(MVN animate) 모션캡처 시스템은 관성식 모션캡처 장비 중 가장 높은 정밀도와 품질을 보여주고 있다. 총 17개의 트래킹 센서가 제공되며 새로 출시된 엔진은 관성식 모션캡처의 약점인 자기 왜곡에 영향을 받지 않으며 주요 관절 각도에 대한 RMS 차이가 5도 미만이고, 90분 이상의 달리기 데이터에서도 일관된 성능을 보여주는 등 모든 유형의 움직임을 안정적이고 일관되게 추적할 수 있다.⁸⁾

4) Agnieszka Szczesna, Et Al. Inertial Motion Capture Costume Design Study, Sensors 2017, 17(3), 612; <https://doi.org/10.3390/s17030612>.

5) JOUAV-A Complete Guide to Inertial Measurement Unit (IMU), 2024.08.03., <https://www.jouav.com/blog/inertial-measurement-unit.html>

6) Xinxin Huang, Yunan Xue, Shuyun Ren and Fei Wang. Sensor-Based Wearable Systems for Monitoring Human Motion and Posture: A Review, Sensors 23(22), 8 November 2023,p.8.

7) ibid., p.8.

8) Martin Schepers, Matteo Giuberti, and Giovanni

[표 2] IMU 모션캡처 시스템 주요 제원

company	Xsense MVN		Rokoko	Perception neuron
sensor system	MVN Link	MVN Awinda	Rokoko Smartsuit Pro II	Perception neuron studio
No of Nodes	17 wired sensor	17 wireless sensor	18 Perception Neuron Studio Body Sensors	17x9DoF(Glove-Ready) 19x9DoF(Stand-alone)
Sample Rate	240 Hz	60 Hz	400hz	750hz
Range	150m	50m	100m	7m
Dimension	160x72x25mm, 150g	47x30x13mm, 20g		43x33x20mm, 15.8g
Batter time	10hours	6hours	5-6hours	10hours
software	Xsens Animate, MVN Analyze	Xsens Animate	rokoko studio	Axis Studio
Static Accuracy	Position ±1cm, angle ±1 deg.	Position ±10cm, angle ±1 deg.	±1 deg.	Roll 0.7, Pitch 0.7, Yaw 2
Real-time	Yes	Yes	Yes	Yes
No of Actors	4	4	5	5
Price	~\$21000	~\$12400	\$4,295	\$8,900

무선(MVN Awinda)또는 유선(MVN Link)추적기의 데이터는 무선 연결을 통해 데이터가 추가로 처리되고 시각화되는 pc로 전송되며 Xsense Animate와 MVN Analyze 소프트웨어 엔진을 통해 게임과 영화를 포함한 3D캐릭터 애니메이션, 인체공학, 스포츠 및 연구를 포함하는 인간 동작 측정(HNM)시장에 대한 맞춤형 엔진을 제공하고 있다.



[그림 4] MVN 분석 사용을 위한 애플리케이션⁹⁾

가장 높은 품질을 보여주지만 가격이 광학식 모션캡처 장비 중 가장 고가이고 소프트웨어 이용료도 연 10,000달러가 넘는 고가이어서 메이저 스튜디오가 아닌 인디 스튜디오에서는 사용이 어렵다는 단점이 있다. Perception Neuron Studio는 초고정밀 항공우주 등급 센서 보정을 사용해 높은 정확도와 운동선수와 유사한 역동적 수준을 달성할 수 있으며 정적 정확도를 0.7도, 피치 0.7도, 요(yaw) 2도와 10시간의 배터리 타임 등이 강점이지만 타제품과 비교해 가동범위가 7m로 제한적이라는 단점이 있다. Rokoko Smartsuit Pro는 특정 위치에 19개의 IMU 센서가 숨겨져 있는

Bellusci, Xsens MVN: Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing, Xsens Technol, 2018, p.1.

9) Movella.com, 2024.08.11.
https://base.movella.com/s/motion-capture-landing-page?language=en_US

웨어러블 MoCap 시스템이며, Sensor Fusion 2.0을 사용한 드리프트 감소 알고리즘, 100m 무선 추적 범위, 고도 추적이 가능한 캡처 레벨 필드 변경, 정밀한 손가락 추적을 위한 하이브리드 IMU 및 EMF 센서 지원으로 저렴한 가격에 뛰어난 성능을 지녀 인디 스튜디오 및 개발자를 위한 제품으로 판매되고 있다. 이러한 상용화된 광학식 모션캡처의 최고 강점은 실시간 동작 캡처가 가능하다는 점이다. 카메라 방식의 광학식 모션캡처는 실시간 동작 캡처가 불가능하지만, IMU 모션캡처는 언리얼 엔진, 유니티3D 엔진 등과 연동한 실시간 모션캡처 인식이 가능하여 라이브 스트리밍, 버추얼 프로덕션, XR컨텐츠 제작 등의 산업에 활용이 자유로운 점이 강점이라 할 수 있다.

3. IMU 모션캡처 선행연구 분석

3-1. 연구 사례

IMU 모션캡처의 정확성과 오류를 측정하는 다양한 연구 결과를 바탕으로 유효성과 신뢰성을 조사하였다. 대부분의 연구는 기존의 광학식 모션캡처(OMC)와 IMU 모션캡처의 동작을 캡처하여 두 동작간의 오차 신뢰도를 RMSE로 정확성을 측정하였다. Samet Ciklacandir et al.(2022)는 OMC 모션캡처시스템과 IMU 센서 기반 모션캡처시스템의 조인트 각도에 대한 성능비교를 연구하였다. Rokoko Smartsuitpro를 사용해 Kinovea와 Bland-Altman 테스트로 비교분석을 실시하였다. 연구결과 두 시스템에 따른 12개 관절의 움직임은 0.96과 1 사이의 높은 상관계수를 계산했으며, 두 시스템 간에 약 3-13도의 차이가 있는 것으로 나타났다.

RMSE값은 약 3.5도 정도로 계산되어 두 시스템 간의 유사한 결과를 보여주었다.¹⁰⁾

Young-Shin Cho, MD, Et Al.(2018)은 관성측정기 기반 모션캡처 분석시스템의 타당성 및 신뢰성 평가를 통해 IMU장치의 유효성과 신뢰성을 평가하였다. OMC 기반 모션캡처와 IMU기반 모션캡처 시스템을 통해 동시에 얻은 평균제곱근 오차(RMSE)를 사용해 보행분석의 타당성을 평가했으며, 신뢰성은 IMU가 측정한 시공간적 매개변수와 운동학적 매개변수의 클래스 내 상관계수를 사용해 검사했다. 분석 결과 OMC와 IMU 간 운동학적 매개변수는 고관절, 무릎관절, 발목관절 각도 RMSE값이 1.39~4.37사이로 IMU의 타당성을 검증했다. 또한 관성센서의 정확도가 3.6~7.9km사이에서 가장 높고 이 속도를 초과할수록 정확도가 하락하였는데, 이는 댄스나 액션 등 빠른 모션을 취득할 때 정확도가 하락하는 문제가 발생할 수 있음을 입증하였다.¹¹⁾

Farwa Ali et al.(2024)는 IMU를 통해 얻은 몸통과 골반 ROM측정값을 산출했으며, 골반을 제외한 모든 측정값에서 오차는 5도 미만이었으며, 골반 시상면 및 횡단면 오차값은 10도 이내의 결과를 보여주었다.¹²⁾

Karina Berner et al.(2020)은 15명의 지원자를 대상으로 7개의 IMU시스템과 8개의 OMC시스템을 사용해 IMU기반 시스템의 타당성과 신뢰성을 확인하였다. 실험 결과, 교정포즈에 대한 정확도는 골반 기울기, 골반 경사, 골반 회전, 고관절 신전, 고관절 내전, 엉덩이 회전, 무릎 신전, 발목 배측에 대한 8개 항목에서 RMSE값이 2.2-3.8 사이, 표준측정오류(SEM)값이 1.1-3.4사이로 측정되어 95%이상의 신뢰도를 나타냈다.¹³⁾

Martin Schepers et al.(2018)은 Xsens 모션캡처 시스템의 화이트박스에서 8명의 남,녀를 대상으로 앞으로 걷기(느림,보통,빠름)와 뛰기(10,12,14km/h) 동작을 8개 카메라의 광학 Qualisys시스템과 비교 실험을 통해 정확성을 측정하였다. 엉덩이, 무릎, 발목 각도의 굴곡/신전, 외전/내전, 내부/외부 회전 각도의 정확성을 측정하였으며, 측정결과는 고관절 굴곡/신전 4.8±2.9, 4.4±1.7, 무릎 외전/내전의 경우±2.9를 나타냈다.¹⁴⁾

Manju Rana,Vikas Mittal(2021)는 스포츠를 위한 웨어러블 IMU센서가 장착된 3d모션캡처 제품들을 착용해 테니스, 배드민턴, 러닝, 축구 등의 동작에 대한 정확도를 측정했다. 교차 검증을 통해 K-NN과 로지스틱 회귀 알고리즘을 사용해 정확도는 각각 82.16%, 87.16%로 나타났고 각 종목의 동작별 정확도는 테니스 82.5-90%, 배드민턴 79.32%, 수영 89.8-96.1%,축구 95.4%-96.1%, 러닝 100%로 나타났다.¹⁵⁾

연구의 정확도를 높이기 위해 연구사례에서 추진된 실험은 신체의 해부학적 축 정렬, 기능적 교정 및 정적 교정 방법을 사용하였다. 해부학적 정렬은 IMU/Magnet 장치 내의 국소 회전 축과 장치가 부착된 축이 관심 분절의 축과 적절하게 정렬되는지에 따라 정확도가 크게 좌우되었고, 장치 좌표 프레임과 세그먼트 좌표 프레임의 정렬을 통한 기능적 교정, 적절한 센서 융합 알고리즘을 사용하여 글로벌 프레임에서 각 센서의 방향을 정하기 위해 짧고 정적인 중립적 교정 포즈 캡처를 통한 정적 교정을 사용하였다. 최근에는 센서와 세그먼트 정렬을 위해 최첨단 딥러닝 접근 방식을 사용하는 등 정확도를 상승시킬 수 있도록 하는 교정 방법들이 추가 개발되고 있다.¹⁶⁾

10) Samet Ciklacandir, Sultan Ozkan, Yalcin Isler, A Comparison of the Performances of Video-Based and IMU Sensor-Based Motion Capture Systems on Joint Angles, 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), pp.3-5.

11) Young-Shin Cho, MD, Et Al, Evaluation of Validity and Reliability of Inertial Measurement Unit-Based Gait Analysis Systems, Ann Rehabil Med, Volume 42(6); 2018, pp.877-879.

12) Farwa Ali, Cecilia A. Hogen, Emily J. Miller, Kenton R. Kaufman, Validation of Pelvis and Trunk Range of Motion as Assessed Using Inertial Measurement Units, Bioengineering 2024, 11(7), 659, pp.6-7.

13) Karina Berner a, John Cockcroft b, Linzette D. Morris c, Quinette Louw, Concurrent validity and within-session reliability of gait kinematics measured using an inertial motion capture system with repeated calibration, Journal of Bodywork & Movement Therapies 24, 2020, pp. 254-255.

14) Martin Schepers Et Al., Op. cit., p.23.

15) Manju Rana, Vikas Mittal, Wearable Sensors for Real-Time Kinematics Analysis in Sports: A Review, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 21, NO. 2, JANUARY 15, 2021, P.1198.

16) Benjamin R. Hindle, Et Al.r, Inertial-Based Human Motion Capture: A Technical Summary of Current Processing Methodologies for Spatiotemporal and Kinematic Measures, Applied Bionics and Biomechanics Volume 2021, Issue 1, pp.08-10.

[표 3] IMU 모션캡처 정확도 선행 연구 사례

저자.연도[각주]	동작	측정	정확성
Samet Cikalacandir et al.,2022. [10]	Hip Flexion Hip Extension Knee Flexion-Extension Ankle Plantar Flexion-Dorsiflexion	RMSE	3.40 3.51 3.08 3.41
Young-Shin Cho, MD, Et Al.20 18.[11]	고관절각도 무릎관절각도 발목관절각도	RMSE	1.43~4.15 1.77~3.13 1.39~4.37
Farwa Ali et al.2024.[12]	pelvis ROM(Frontal, Sagital, Tranverse) Trunk ROM(Frontal, Sagital, Tranverse)	표준오차 (SE)	(-2.3-4.2,-6.0-2.8, -2.8-7.2) (-2.9-2.1,-2.5-2.2, -2.7-4.8)
	pelvis ROM(Frontal, Sagital, Tranverse) Trunk ROM(Frontal, Sagital, Tranverse)	RMSE	(0.34-1.26,0.27-6.65 ,0.64-2.61) (0.37-1.04,0.34-1.49 ,0.37-3.13)
Karina Berner et al.2020.[13]	Pelvis tilt, Pelvis obliquity, pelvis rotation, Hip flexion ,Hip adduction, Hip Rotation, Knee extension, Ankle plantarflexion	표준측정 오류 (SEM)	(1.1,1.2,3.4,1.8, 1.4,3.4,2.4,1.8)
	Pelvis tilt, Pelvis obliquity, pelvis rotation, Hip flexion ,Hip adduction, Hip Rotation, Knee extension, Ankle plantarflexion	RMSE	(2.2,4.6,3.6,3.6, 5.8,3.3,2.9)
Martin Schepers et al.2018 .[14]	Hip(굴곡/신전,외전/내전,내부/외부회전) Knee(굴곡/신전,외전/내전,내부/외부회전) Ankle(굴곡/신전,외전/내전,내부/외부회전)	RMS	4.8-2.9,3.7-1.8,5.7-2.9 3.7-2.2,4.4-1.7,8.0-3.4 4.7-2.3,7.2-2.6,5.7-2.2
Manju Rana, Vikas Mitta.2021. [15]	Tennis Badminton Swimming Football Running	동작인식 정확도	82.5%-90% 79.32% 89.8~96.1% 95.4~96.1% 100%

3-2. 선행연구 결과 분석

선행연구 사례들을 종합해보면 대부분의 실험은 IMU모션캡처의 동작측정을 통해 동일 실험 대상의 OMC모션캡처 데이터나 비디오 영상과의 정확도 차이를 RMSE로 측정하여 정확도를 측정하였다. RMSE값은 초기 측정 시 오차값이 컸으나 환경설정 및 부착장치 등을 보정한 후의 데이터는 허용범위 안에서 수치를 나타내었으며 고관절, 무릎, 발목에 대한 정면, 시상면, 후면의 관절 정확도는 0.3에서 7.2사이의 RMSE 범위를 나타냈다. RMSE 측정값은 수치가 낮을수록 정확하지만 데이터값의 범위에 따라 상대적인 수치이기 때문에 정확하더라도 인정받을 수 있는 특정한 범위는 존재하지 않지만 데이터값의 범위에 따라 정확도를 측정할 수 있다. 관절 별 세부 결과를 보면 고관절 굴곡과 신전(앞뒤 회전)의 정확도는 실험에 따라 RMSE 0.34~7.2, 무릎관절 회전의 정확도는 1.77-8.0, 발목관절의 정확도는 1.39~7.2 수치를 나타내었고, 몸통에 대한 정확도는 0.37~3.13 수치를 나타내 상체 움직임의

정확도가 더 낮게 측정되었다. Manju Rana(2021)는 여러 가지 스포츠 동작에 최적화된 IMU모션캡처 장비의 정확도를 다양한 기술 수준 별로 측정하였는데 79.32%~100%까지의 동작 정확도가 측정되었고 대부분의 종목에서 90%이상의 정확도를 나타냈다. 이러한 연구결과를 종합했을 때 움직임이 큰 스포츠 활동 인식이나 경미한 측정이 필요한 운동학 분석에도 현재 IMU방식의 모션캡처 시스템 활용도가 증가하고 있고 다양한 데이터 융합 기술을 적용하여 정량화 가능한 데이터와 성과 매트릭스를 실시간으로 얻을 수 있다는 점은 지속적 발전 가능성이 높다고 할 수 있다.

3-3. 한계

모션캡처에 대한 정확도에 대한 선행연구는 기존 OMC 장비와의 오차 비교, 비디오 이미지와의 정확도를 비교하는 Bland-Altman테스트 등으로 정확도를 측정할 수 있으나 다음과 같은 한계적 요소가 발생하였다. 첫째 IMU 모션캡처 환경에 따른 변수 - 강자성 교란이 있는 경우 시간이 증가하는 드리프트 발생, 절대

골격 위치 운동학을 직접 측정할 수 없다는 문제점이 한계로 지적되었다. 17) IMU 시스템의 자력계는 글로벌 방향추정을 정의할 수 있지만 캡처 환경의 다른 컴퓨터 장비와 건물의 구조용 철 등이 상당한 강자성 간섭 요인이 될 수 있기 때문에 이에 대한 자기적 교정이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 지상 40cm 이상 높이에서 이동을 수행하고, 강자성 교란이 낮은 영역에서 모션데이터 수집을 하고 센서융합 칼만 필터가 자성 교란을 보정할 수 있도록 캡처를 시작하기 전에 충분한 보정시간을 보장하는 것도 자성 교란으로 인한 방향추정 오류를 줄이는 것으로 나타났다.18)

둘째, 대부분의 연구가 스포츠의학이나 재활의학을 위한 임상연구 목적으로 버추얼 프로덕션에 활용할 수 있는 동작가동범위가 크고 빠른 액션이나 춤에 대한 IMU의 정확도를 측정한 사례가 없고 보행연구나 하지, 몸통에 대한 측정결과가 대부분이라 신뢰성 있는 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

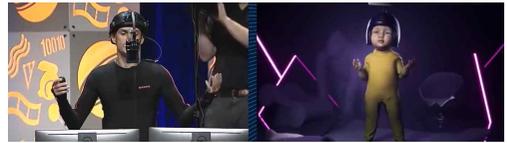
마지막으로 관성식 모션캡처는 최근 들어 해마다 뛰어난 기술발전으로 기존의 단점을 보완한 버전으로 출시되고 있어 선행연구에 대한 데이터를 근거로 IMU의 신뢰도와 타당도를 평가하기에 어려운 점이 있다. Xsens나 Rokoko 모션캡처 장비의 경우 버전이 업데이트되며 기존의 자성에 대한 방해요소나 점프, 계단 높낮이 인식 물가 등의 문제점을 개선하여 출시하였다. 이러한 부분들을 반영하여 최신 시스템에 대한 후속연구가 지속적으로 필요하다.

4. 버추얼프로덕션 활용을 위한 요소 고찰

4-1. 버추얼 프로덕션과 모션캡처 시스템

버추얼프로덕션은 창의성을 강화하고 시간을 절약하기 위해 고안된 광범위한 컴퓨터 지원 영상제작방식을 광범위하게 일컫는 말이다. 프리비즈부터 라이브TV, 그린스크린 합성, VR/AR, 버추얼유먼 콘텐츠까지 리얼타임 기술을 사용하여 예전에 할 수 없었던 새로운 방식으로 프로덕션에 접근하고 있다. 모션캡처는 액터의 큰 동작뿐 아니라 얼굴 표정과 손 표현과 같은 미세한 움직임까지도 캡처해 액터의 연기를 디지털 캐릭터로 재생성하는 것을 목표로 한다. IMU방식의 모션캡처는

광학식 OMC와 비교해 구축비용이 저렴하고 환경세팅에 자유로우며 모션캡처 동작의 라이브 동작 구현에 강점이 있어 버추얼 프로덕션 분야에 활용 시 유리하다 할 수 있다.



[그림 5] IMU Xsense모션캡처 Real-Time Live(2018, Siggraph)

버추얼 프로덕션 제작에서 가장 많이 활용되는 에픽 게임즈의 언리얼엔진 화이트백서에 따르면 버추얼프로덕션 퍼포먼스 캡처 시스템을 선택할 때 어떤 유형의 시스템을 사용할 수 있는지 그리고 각 시스템의 구성, 정확도, 요구에 대한 적합성, 비용 등이 어떻게 다른지 알아야 하고 기술의 종류에 따라 광학식, 관성식, 이미지기반, 하이브리드 시스템을 선택해야 한다고 설명한다.19)

4-2. IMU 시스템의 버추얼 프로덕션 고려 요소

IMU 모션캡처시스템은 연구결과 광학식 모션캡처와 비교하여 정확도에서 크게 차이가 나지 않았으나 부위별 캡처나 환경적 제약 등을 고려해야 할 요소들이 발생한다. 얼굴의 표정을 나타내야 하는 페이스캡처의 경우 IMU는 측정해야하는 작은 움직임에 비해 크기가 너무 크기 때문에 적합하지 않기 때문에 이미지기반 캡처시스템의 HMC(Head-mounted Camera)를 하이브리드로 착용해야 한다. 이미지 기반시스템은 카메라로 촬영한 2차원 이미지로 시간에 따라 변화하는 캐릭터의 안면 움직임을 전달한다. 손가락 동작은 IMU 수트와 별도로 IMU센서가 장착된 글러브를 착용하여 캡처할 수 있다. 캡처 환경에 대한 고려요소는 광학식과 달리 액터들의 가림현상이나 겹침 현상에서는 자유롭지만 정확한 측정을 위한 방해요소, 수트 센서와 관절 위치의 정확한 착용이 필요하다. 또한 IMU모션캡처는 자력간섭이 발생할 수 있고 시간경과에 따라 액터의 실제 포지션에서 점점 멀어지는 드리프트 현상이 일어날 수 있으므로 보정과 테스트를 시행 해야 한다. 예산적 측면에서 OMC보다 저렴한 예산으로 IMU시스템을 구축할 수 있지만 다인 액터의 동작을 캡처할 때

17) Karina Berner a. Et Al., Op. cit., p252.

18) Benjamin R. Et Al., Op. cit., p10.

19) David Hibbitts, Choosing a performance capture system for real-time mocap, Unreal Engine Whitepaper, 2020, pp.3-4.

인원에 비례해 수트가 필요한 점은 고려해야 한다. 마지막으로 버추얼휴먼, XR콘텐츠 등 라이브 퍼포먼스를 위한 모션캡처 활용 시 IMU는 탁월한 호환성과 지원을 할 수 있다는 강점이 있다. 대부분의 상용화된 IMU 모션캡처는 언리얼엔진, 유니티3D등 게임엔진을 통해 실시간 동작인식을 지원하기 때문에 카메라 기반의 광학식 모션캡처와 비교하여 버추얼프로덕션 콘텐츠 제작에 훨씬 유리하다고 할 수 있다.

[표 4] 버추얼프로덕션을 위한 IMU 시스템 세팅

Factors to consider	
Accuracy	Facial Capture: IMU불가> markerless Image-based System(HMC) Hand/Finger Capture : IMU Glove
Environment	Pose/Position Calibration Magnetic interference Drift
Cost	Highend IMU Suit - \$\$ Imu Suit - \$ OMC Studio - \$\$\$\$ * IMU는 다중인원 캡처 시 인원에 비례해 추가비용 발생
Real-time	C/C++ API and plugin for Unity3D® and Unreal®.등 지원
Hybrid	Vive Tracker OptitrackActivePuck IMU Suit+Vive Tracker IMU Suit+Cubic Motion/Apple ARKit

5. 결론

모션캡처 시스템은 시간공간적 측정과 관절 각도의 운동학적 측정을 캡처하는 목적으로 사용되는데 지금까지의 연구결과를 정리해보면 먼저 광학 마커 모션캡처 시스템(OMC)은 높은 구축 비용과 캡처 볼륨을 넓히려면 많은 카메라가 설치되어야 하며 마커에 대한 시야 유지, 가려짐으로 인한 데이터 손실 등을 고려해야 하는 문제가 있다. 다음 마커리스 모션캡처는 OMC와 비교해 저렴한 비용으로 동작을 캡처할 수 있으나 비전 카메라나 2D동영상을 기반으로 3D모션을 측정하기 때문에 시차 오류와 원근오류가 발생할 수 있으며 후처리 보정작업이 많이 필요하다는 단점이 있다. IMU 관성식 모션캡처는 OMC와 비교하여 분석 결과, 움직임의 정확성이 크게 떨어지지 않고 저렴한 구축 비용, 리얼타임 퍼포먼스 캡처에 최적화, 실내외 환경에 대한 자유로운 캡처 등이 우위에 있어 라이브 퍼포먼스가 어려운 OMC나 라이브캡처는 가능하나 동작의 정확성이 떨어지는 마커리스 비전 캡처와 비교해 버추얼 프

로덕션 제작에 유리한 것으로 나타났다. 다만 자력 간섭 요인을 고려해야 하고 페이스얼 캡처같은 섬세한 움직임의 캡처는 구조적으로 어려워 하이브리드 시스템의 보조를 받아야 하는 점, 캡처 시간이 증가할수록 오류가 커지는 드리프트 현상 등은 IMU 캡처 시스템이 향후 지속적으로 개선해야 할 요소로 꼽히지만 그럼에도 불구하고 움직임이 큰 스포츠 활동 인식이나 정밀한 측정이 필요한 운동학 분석에도 현재 IMU방식의 모션캡처 시스템 활용도가 증가하고 있고 다양한 데이터 융합 기술을 적용하여 정량화 가능한 데이터와 성과 매트릭스를 실시간으로 얻을 수 있다는 점은 지속적 발전 가능성이 높다고 할 수 있다. 또한 IMU 시스템의 하드웨어, 소프트웨어적 개선과 함께 정확도를 높이기 위한 보정, 장비의 관절 부착 위치에 따른 정확도 데이터 상승, 자력간섭과 드리프트 현상을 최소화 할 수 있는 방안 등에 대한 후속적인 연구가 이루어지기를 기대한다.

참고문헌

1. David Hibbitts, Choosing a performance capture system for real-time mocap, Unreal Engine Whitepaper, 2020.
2. Martin Schepers, Matteo Giuberti, and Giovanni Bellusci, Xsens MVN: Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing, Xsens Technol, 2018.
3. 임우택, 모션 캡처 시스템에 대한 고찰: 임상적 활용 및 운동형상학적 변인측정 중심으로, 한국전문물리치료학회지 29권 2호, 2022.
4. Agnieszka Szczesna, Et Al. Inertial Motion Capture Costume Design Study, Sensors 2017, 17(3), 612.
5. Benjamin R. Hindle, Justin W. L. Keogh, Anna V. Lorimer, Inertial-Based Human Motion Capture: A Technical Summary of Current Processing Methodologies for Spatiotemporal and Kinematic Measures, Applied Bionics and BiomechanicsVolume

2021, Issue 1.

6. Farwa Ali, Cecilia A. Hogen, Emily J. Miller, Kenton R. Kaufman, Validation of Pelvis and Trunk Range of Motion as Assessed Using Inertial Measurement Units, *Bioengineering* 2024, 11(7), 659.
7. Karina Berner a, John Cockcroft b, Linzette D. Morris c, Quinette Louw, Concurrent validity and within-session reliability of gait kinematics measured using an inertial motion capture system with repeated calibration, *Journal of Bodywork & Movement Therapies* 24, 2020.
8. Manju Rana, Vikas Mittal, Wearable Sensors for Real-Time Kinematics Analysis in Sports: A Review, *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 21, NO. 2, JANUARY 15, 2021.
9. Samet Ciklacandir, Sultan Ozkan, Yalcin Isler, A Comparison of the Performances of Video-Based and IMU Sensor-Based Motion Capture Systems on Joint Angles, 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU).
10. Xinxin Huang, Yunan Xue, Shuyun Ren and Fei Wang. Sensor-Based Wearable Systems for Monitoring Human Motion and Posture: A Review, *Sensors* 23(22), 8 November 2023.
11. Young-Shin Cho, MD, Et Al. Evaluation of Validity and Reliability of Inertial Measurement Unit-Based Gait Analysis Systems, *Ann Rehabil Med*, Volume 42(6); 2018.
12. [Movella.com](https://www.movella.com)
13. [optitrack.com](https://www.optitrack.com)
14. terms.naver.com.
15. www.jouav.com