

Traduction de l'article scientifique sur le système PAViR

Résumé

Le dispositif d'analyse posturale et de reconstruction virtuelle (PAViR) utilise une caméra RGB-Depth comme capteur, permettant de produire des images du squelette reconstruit. [...]

1. Introduction

La posture est définie comme l'alignement ou l'orientation du corps en position verticale [...]

2. Matériel et Méthodes

2.1 Participants [...]

2.2 EOS

Chaque patient a bénéficié d'un examen EOS en mode pleine longueur et à faible dose [...]

2.3 PAViR

L'évaluation par le PAViR (Moti Physio, MG Solutions, Séoul, Corée du Sud) a été réalisée pour chaque participant [...]

2.3.1 Caméra RGB-D

Le système Moti Physio utilise une caméra 3D RGB-D en temps réel (modèle Astra Pro, Orbbec 3D Technology [...])

2.3.2 Support Vector Machine

La caméra RGB-D capte les données de face, de côté et de dos, pendant que le sujet se tient [...]

2.3.3 Méthode géométrique

Les coordonnées des données de profondeur de l'utilisateur sont représentées en (x, y, z) [...]

2.4 Critères d'évaluation

Le critère principal de l'étude portait sur les paramètres de posture humaine, analysés selon le plan [...]

2.5 Analyse des données

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SPSS pour Windows [...]

3. Résultats

3.1 Résultats des mesures par EOS et PAViR [...]

3.2 Fiabilité Intra-Observateur du PAViR

Tous les coefficients de corrélation intra-observateur pour les paramètres en vue coronale [...]

3.3 Validation du PAViR par rapport aux paramètres de l'EOS

Les résultats principaux ont été comparés afin de valider le PAViR pour chacun des paramètres [...]

4. Discussion

En tant qu'étude pilote, les paramètres d'asymétrie posturale ont été comparés entre les mesures obtenues par PAViR [...]

5. Conclusions

Le PAViR présente une excellente fiabilité intra-observateur chez les personnes souffrant de dysfonction somatique [...]

Informations supplémentaires

Contributions des auteurs, financement, comité d'éthique, consentement, disponibilité des données, remerciements, conflits d'intérêts.

References

Article

Validité et fiabilité d'un dispositif d'analyse posturale non radiographique basé sur une caméra RGB-Depth comparée à l'imagerie 3D EOS : une étude prospective observationnelle

Hyo Jeong Lee ¹, Han Eol Cho ², Myungsang Kim ², Seok Young Chung ² and Jung Hyun Park ^{2,3,4,*}

¹ Department of Rehabilitation Medicine, Bundang Jesaeng Hospital, Seongnam-si 13590, Gyeonggi-do, Republic of Korea

² Department of Rehabilitation Medicine, Gangnam Severance Hospital, Rehabilitation Institute of Neuromuscular Disease, Yonsei University College of Medicine, Seoul 06229, Republic of Korea

³ Department of Integrative Medicine, Yonsei University College of Medicine, Seoul 06229, Republic of Korea

⁴ Department of Medical Device Engineering and Management, Yonsei University College of Medicine, Seoul 06229, Republic of Korea

• Correspondence: rmpjh@yuhs.ac; Tel.: +82-2-2019-3490

Résumé :

Le dispositif d'analyse posturale et de reconstruction virtuelle (PAViR) utilise une caméra RGB-Depth comme capteur, permettant de produire des images du squelette reconstruit. Le PAViR permet une analyse rapide de la posture globale à partir de prises répétées, sans exposition aux radiations et tout en restant habillé, fournissant une image virtuelle du squelette en quelques secondes. Cette étude vise à évaluer la fiabilité du système lors de prises répétées et à examiner sa validité en comparaison avec les paramètres obtenus via des radiographies corporelles complètes à faible dose (EOS), dans le cadre d'un usage diagnostique.

Dans cette étude prospective et observationnelle, 100 patients souffrant de douleurs musculo-squelettiques ont bénéficié d'un examen EOS pour obtenir des images coronales et sagittales de l'ensemble du corps. Les mesures évaluées concernaient les paramètres posturaux humains, répartis selon le plan de station debout dans les systèmes EOS et PAViR, comme suit :

- (1) Vue coronale (hauteur asymétrique des clavicules, obliquité pelvienne, angles Q bilatéraux des genoux, et axe entre la 7e vertèbre cervicale et la ligne sacrée centrale (C7-CSL))
- (2) Vue sagittale (posture de la tête projetée vers l'avant).

La validation du PAViR par rapport aux images EOS a révélé une **corrélation positive modérée** pour l'alignement C7-CSL ($r = 0,42$, $p < 0,01$). La posture de la tête en avant ($r = 0,39$, $p < 0,01$), la hauteur asymétrique des clavicules ($r = 0,37$, $p < 0,01$) et l'obliquité pelvienne ($r = 0,32$, $p < 0,01$) présentaient des corrélations légèrement positives par rapport à l'EOS.

Le PAViR démontre une **excellente fiabilité intra-évaluateur** chez les patients atteints de dysfonction somatique. À l'exception des deux angles Q, le PAViR présente une validité allant de **modérée à acceptable** en comparaison à l'imagerie EOS pour les paramètres représentant les déséquilibres coronaux et sagittaux. Bien que le système PAViR ne soit pas encore utilisé en milieu clinique, il pourrait devenir un outil d'analyse posturale diagnostique sans rayonnement, **accessible et économique**, dans l'ère post-EOS.

Une posture inadéquate ou anormale conduit à des mécanismes dysfonctionnels. Elle constitue une **cible thérapeutique en médecine manuelle** [10], notamment en chiropraxie et en ostéopathie, et est codifiée depuis 2016 selon la **Classification Internationale des Maladies – 10e Révision, Modification Clinique (CIM-10-CM), Code M99.0**. La dysfonction somatique est généralement évaluée par palpation à travers quatre critères : **asymétrie (A), altération de l'amplitude de mouvement (R), sensibilité à la pression (T), et modification de la texture des tissus (T)** [8]. Parmi ces critères, l'évaluation de l'asymétrie repose en grande partie sur une inspection subjective. L'utilisation d'un outil quantitatif pour une évaluation objective permettrait un diagnostic plus précis. De plus, si l'analyse portait sur la **structure corporelle dans son**

ensemble, plutôt que sur une seule partie, elle serait d'autant plus pertinente pour comprendre l'état pathologique du patient, d'un point de vue biomécanique.

Plusieurs études ont souligné l'importance de **quantifier la posture** via des méthodes radiographiques ou non radiographiques [11]. Les patients souffrant de douleurs musculo-squelettiques expriment un fort besoin d'examen d'imagerie pour obtenir un diagnostic [12]. Bien que les radiographies aux rayons X constituent actuellement le **standard de référence**, l'exposition aux radiations ionisantes peut induire des cancers [13]. Ces méthodes sont donc limitées, notamment chez les **populations sensibles**, telles que les adolescents ou les femmes enceintes. Des **méthodes non radiographiques** permettent un **suivi sans exposition répétée** aux rayonnements [14]. Parmi les alternatives viables figurent la **biophotogrammétrie**, l'analyse du mouvement par infrarouge, le **fil à plomb**, la **souris vertébrale**, la **topographie de surface**, et les méthodes à **ultrasons à trois points**.

1. Introduction

La posture est définie comme l'alignement ou l'orientation du corps en position verticale [1]. Elle est davantage liée à la **longueur musculaire et à l'activation des muscles** qu'à la force exercée [2]. En clinique, la posture est généralement évaluée à l'aide de la **ligne gravitationnelle idéale** ou d'une **ligne verticale** passant par des repères anatomiques situés à l'avant, à l'arrière et sur les côtés du corps [3]. Une « bonne » posture est considérée comme un **alignement symétrique, droit et énergétiquement efficient** [4]. Elle est essentielle pour **réduire le risque de blessures**, en particulier celles liées à des postures prolongées, statiques ou inadaptées [5], ainsi qu'à **certains troubles musculosquelettiques cumulatifs** [6].

La **dysfonction somatique** désigne un ensemble d'affections du système musculosquelettique et des tissus conjonctifs, définies comme une **altération du fonctionnement** des composants du système somatique (le cadre structural du corps) [7–9]. Cette dysfonction est souvent aggravée par une mauvaise posture. Cependant, les méthodes actuelles dépendent directement de calculs mathématiques et de procédures de collecte, et peu d'études les ont évaluées de manière systématique [14,15].

Le système d'imagerie **EOS** (EOS Imaging, Paris, France) est un dispositif de **radiographie corporelle complète à faible dose**, utilisé chez les patients en **position debout**. Il repose sur la technologie de détection par chambre de Charpak, lauréate du **prix Nobel de physique en 1992** [16–18].

Parmi les méthodes radiographiques actuelles, l'Eos offre une précision relativement élevée. La dose d'un cliché micro-dose avec l'Eos est de **2,6 µSv**, bien **inférieure à la dose quotidienne de radiation naturelle** (environ **2,4 mSv/an** en moyenne mondiale) [19–21].

Ainsi, l'Eos est couramment utilisé pour diagnostiquer les anomalies et malpositions de la colonne vertébrale, du bassin et des membres inférieurs à l'aide de nombreux paramètres [16].

Cependant, le coût élevé de **maintenance et de main-d'œuvre** limite son accessibilité en pratique clinique [16]. De plus, les patients doivent adopter une **posture peu naturelle**, avec les mains sur les épaules ou les os zygomatiques, dans un espace confiné, typique de ce type d'examen. Enfin, toutes les méthodes d'imagerie diagnostique actuelles, y compris l'Eos, nécessitent l'intervention d'une personne pour mesurer ou extraire les paramètres.

Des **technologies de caméras 3D en profondeur, en temps réel**, ont émergé grâce aux récentes avancées en matière de caméras et de traitement d'image. Il est désormais possible d'évaluer et de quantifier de manière répétée la forme corporelle en temps réel, ainsi que de reconstruire l'axe vertébral et le squelette grâce à un **algorithme spécialisé d'estimation de posture humaine** [22–24].

Ces procédés permettent une évaluation **sans exposition aux radiations**, nécessitent **moins d'espace** pour l'installation du matériel, et engendrent **des coûts bien moindres**. En outre, les résultats sont générés **automatiquement**, sans intervention médicale pour la mesure.

Dans cette étude, nous proposons un **nouvel appareil** d'évaluation posturale basé sur une **caméra Red Green Blue-Depth (RGB-D)** associée à un **algorithme de reconstruction du squelette virtuel**. Ce dispositif d'analyse posturale et de reconstruction virtuelle (PAViR) permet une **analyse rapide de la posture globale** à partir de plusieurs clichés successifs, sans exposition aux radiations, et fournit une **représentation virtuelle du squelette en quelques secondes**.

L'étude vise à répondre aux deux questions suivantes :

1. Chez les personnes présentant une dysfonction somatique, le PAViR est-il **fiable** lors de prises répétées ?
2. En tant qu'outil d'imagerie diagnostique, le PAViR est-il **valide** comparé aux paramètres obtenus par EOS ?

2. Matériel et Méthodes

2.1. Participants

Entre janvier 2020 et juin 2020, une **étude prospective** a été menée auprès de patients présentant une **dysfonction somatique**, diagnostiquée selon la **CIM-10**, dans un service de médecine de rééducation d'un hôpital universitaire.

Les **critères d'exclusion** comprenaient :

- les patients de **moins de 19 ans**,
- un **indice de masse corporelle (IMC)** supérieur à **35 kg/m²**,
- des antécédents de **chirurgie vertébrale avec pose de matériel métallique**,
- les **femmes enceintes** ou susceptibles de l'être.

Les **données démographiques** sont présentées dans le Tableau 1.

Un total de **100 patients** ont été inclus, dont **44 hommes et 56 femmes**, avec un âge moyen de **47,2 ans**. L'**IMC moyen** était de **23,1 ± 3,5 kg/m²**.

Le **consentement éclairé** pour la publication des données et des images à caractère personnel dans une revue en accès libre a été obtenu pour tous les participants.

Cette étude a été **approuvée par le comité d'éthique** de notre institution (réf. 3-2019-0305), et a été réalisée en conformité avec les **lignes directrices et règlements en vigueur**, ainsi qu'avec la **Déclaration d'Helsinki**.

Tableau 1. Caractéristiques démographiques des participants. (à intégrer lorsque les données du tableau sont disponibles)

Table 1. Demographic characteristics of participants.		
Variables (<i>n</i> = 100)	Values	Range
Gender, n male/female	44/56	
Age (y), (mean $\pm$ SD)	47.2 $\pm$ 16.5	19–81
Weight (kg), (mean $\pm$ SD)	63.3 $\pm$ 13.1	37.4–89.3
Body height (cm), (mean $\pm$ SD)	163.4 $\pm$ 19.3	143.0–183.0
Body mass index (kg/m ²), (mean $\pm$ SD)	23.1 $\pm$ 3.5	15.6–30.8

SD standard deviation.

2.2. EOS

Chaque patient a bénéficié d'un examen EOS en **mode pleine longueur et à faible dose**.

Les participants ont été invités à adopter une **position debout fonctionnellement chargée**, c'est-à-dire **épaules fléchies à 45° et mains posées sur les os zygomatiques**, tout en regardant droit devant eux [25–28]. La posture debout était **étroitement surveillée par un opérateur expérimenté**, afin de s'assurer qu'aucun **segment vertébral ne compensait les mouvements** des bras dans l'espace restreint de l'équipement. Des **images coronales et sagittales** de l'ensemble du corps ont été obtenues.

2.3. PAViR

L'évaluation par le **PAViR** (Moti Physio, MG Solutions, Séoul, Corée du Sud) a été réalisée pour chaque participant, **en tenue vestimentaire normale**, et **deux fois en l'espace de 2 minutes** par un **médecin expérimenté**, afin d'évaluer la **fiabilité intra-observateur**.

Lors de l'examen, le participant suit les instructions du système PAViR et se place **face à l'avant, de côté, puis de dos**, comme pour une prise de vue. Le rôle du médecin se limite à **vérifier que la personne se tient bien dans la position indiquée par le laser**.

2.3.1. Caméra RGB-D

Le système Moti Physio utilise une **caméra 3D RGB-D en temps réel** (modèle *Astra Pro*, Orbbec 3D Technology International, Inc., Troy, MI, États-Unis) comme capteur [29,30]. Pour capturer les mouvements humains, des méthodes **sans marqueurs**, simples et accessibles, sont généralement employées à l'aide d'une caméra RGB-D [29].

Le matériel PAViR est constitué de plusieurs unités :

- **Une unité d'affichage**, qui informe visuellement le sujet s'il adopte la bonne posture et affiche le résultat final.
- **Une unité d'entrée**, dont la caméra RGB-D capte les données du sujet.
- **Une unité de traitement**, qui analyse les données issues de la caméra pour générer l'image à afficher.
- **Une unité de positionnement**, composée d'un **indicateur laser** et d'un **tapis de sol**, projette une croix laser au sol à une distance précise de l'appareil, assurant ainsi une **position fixe et standardisée** pour l'enregistrement par la caméra RGB-D 3D en temps réel.

2.3.2. Support Vector Machine (SVM)

La caméra RGB-D capte les données **de face, de côté et de dos**, pendant que le sujet se tient dans une **position confortable pendant 2 à 3 secondes**, sans bouger.

Le système génère une **silhouette humaine** à partir des données de profondeur, à l'aide de la **méthode de soustraction de l'arrière-plan** [11,31].

Ensuite, un algorithme de traitement applique la technique **Simple Linear Iterative Clustering** (segmentation en super-pixels), et les différentes parties du corps sont identifiées à l'aide d'un **classificateur SVM (Support Vector Machine)** (voir Figure 1) [22,23,30,32].

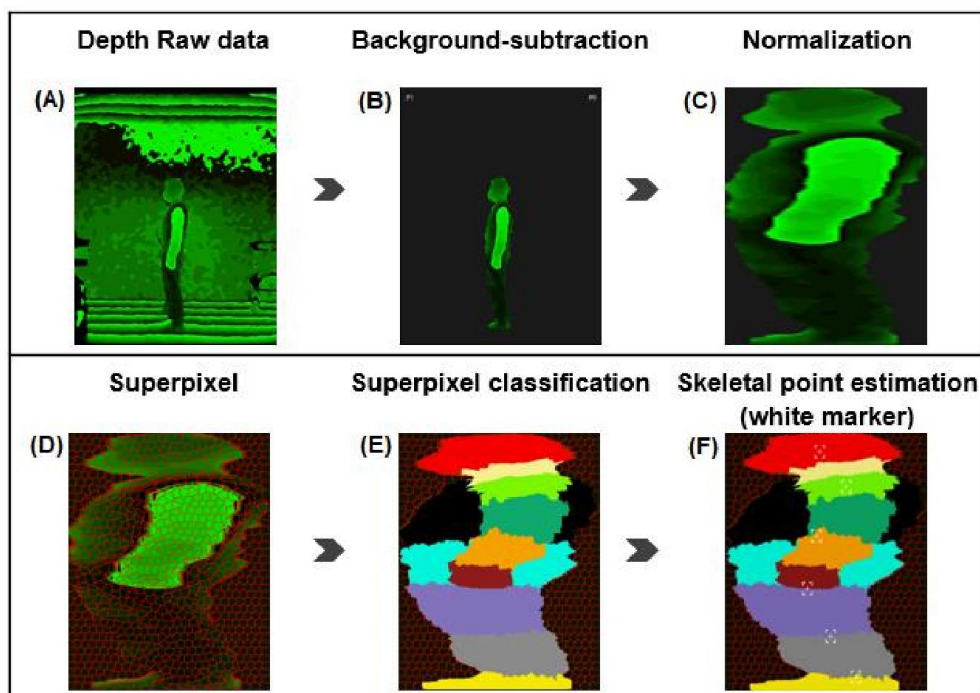


Figure 1.

Un exemple de mesure en **vue latérale (A)**.

Le schéma montre le **processus d'estimation de la posture squelettique humaine** à partir des données d'une caméra de profondeur.

Après la création d'une **silhouette humaine** via la **méthode de soustraction de l'arrière-plan (B)**, le sujet est **normalisé (C)**.

La **classification des différentes parties du corps**, représentées par des couleurs variées, correspond à un **algorithme d'analyse déjà entraîné**, utilisant la **segmentation par Simple Linear Iterative Clustering (D, E)**.

Les **points squelettiques** sont ensuite extraits grâce à un **algorithme de traitement d'image**.

Dans une image sans marqueurs physiques (E), des **marqueurs blancs** sont **générés automatiquement** via une série d'étapes (F).

Illustration fournie par MG Solutions.

2.3.3. Méthode Géométrique

Les coordonnées des données de profondeur de l'utilisateur sont représentées en **(x, y, z)**, exprimées en millimètres (**Figure 2A**).

Il est nécessaire de **corriger les perturbations** liées aux vêtements amples, aux cheveux ou aux éléments non essentiels au squelette.

Pour contourner ce problème, **des hypothèses géométriques** sont formulées. Cette opération est **recalculée à chaque image pendant 2 à 3 secondes**.

Les **28 points de repère anatomiques** sont ainsi définis et utilisés pour établir la **valeur finale moyenne**, correspondant aux **points osseux du squelette en 3D**, qui sont ensuite appliqués à un **modèle tridimensionnel (Figure 2)**.

Les résultats issus de cet algorithme sont présentés via :

- Un **modèle 3D interactif virtuel** sur **écran LCD**,
- Des images **coronales et sagittales imprimées** ou transmises au format **PNG par courriel**.

2.4. Critères d'Évaluation

Le **critère principal** de l'étude portait sur les **paramètres de posture humaine**, analysés selon le plan de station debout, à la fois dans les systèmes **EOS** et **PAViR**, comme suit :

1. Vue coronale :

- Hauteur asymétrique des clavicules
- Obliquité pelvienne
- Angles Q bilatéraux des genoux
- Axe entre la 7^e vertèbre cervicale et la ligne sacrée centrale (**C7-CSL**)

2. Vue sagittale :

- Posture de la tête projetée vers l'avant

Dans le système EOS, **les mesures ont été effectuées manuellement par un médecin**.

Les **six paramètres posturaux** mesurés sur chaque image incluaient :

1. L'**angle** entre la ligne horizontale et la ligne reliant les points les plus élevés des clavicules
2. La **distance horizontale** entre les points médians des crêtes iliaques bilatérales
3. L'**angle formé entre le tendon rotulien et l'épine iliaque antéro-supérieure**
4. *(non numéroté dans l'original — à confirmer)*
5. La **distance verticale entre le centre de C7 et la ligne sacrée centrale**
6. L'**angle entre le centre de C7 et le canal auditif**, illustré en **Figure 3**

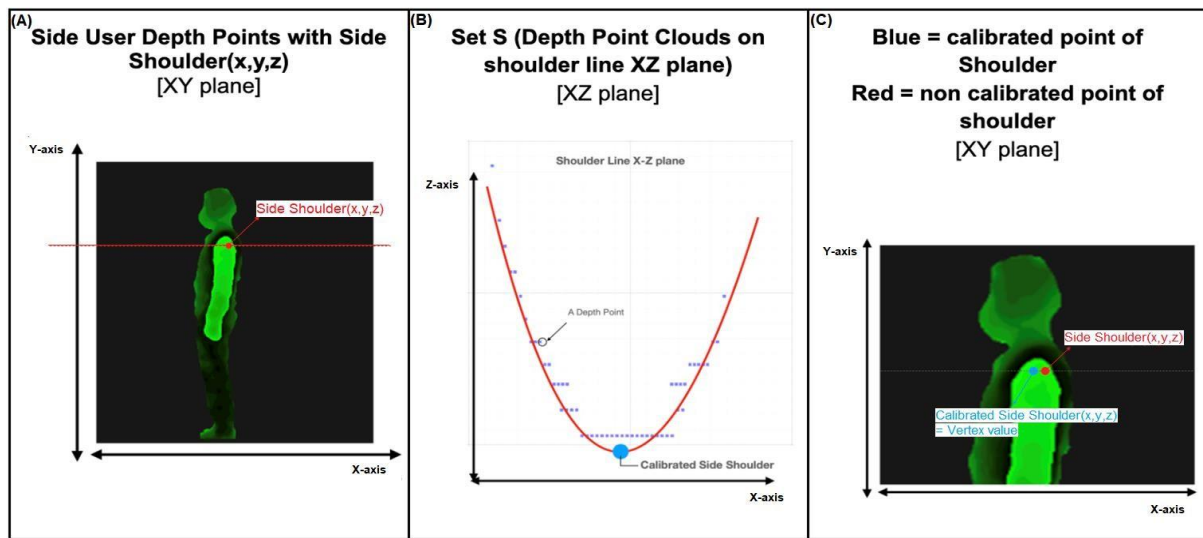


Figure 2.

Exemple de « point squelettique calibré de l'épaule latérale », vu de côté.

(A) Points de profondeur latéraux de l'utilisateur, avec l'épaule latérale représentée par ses coordonnées (x, y, z) dans le plan XY.

(B) L'ensemble S est défini comme l'ensemble de points de profondeur situés sur la ligne de l'épaule, dans le plan XZ ; ces points forment une courbe représentée par des équations quadratiques.

(C) Le point calibré de l'épaule est ensuite généré dans le plan XY.

Illustration fournie par MG Solutions.

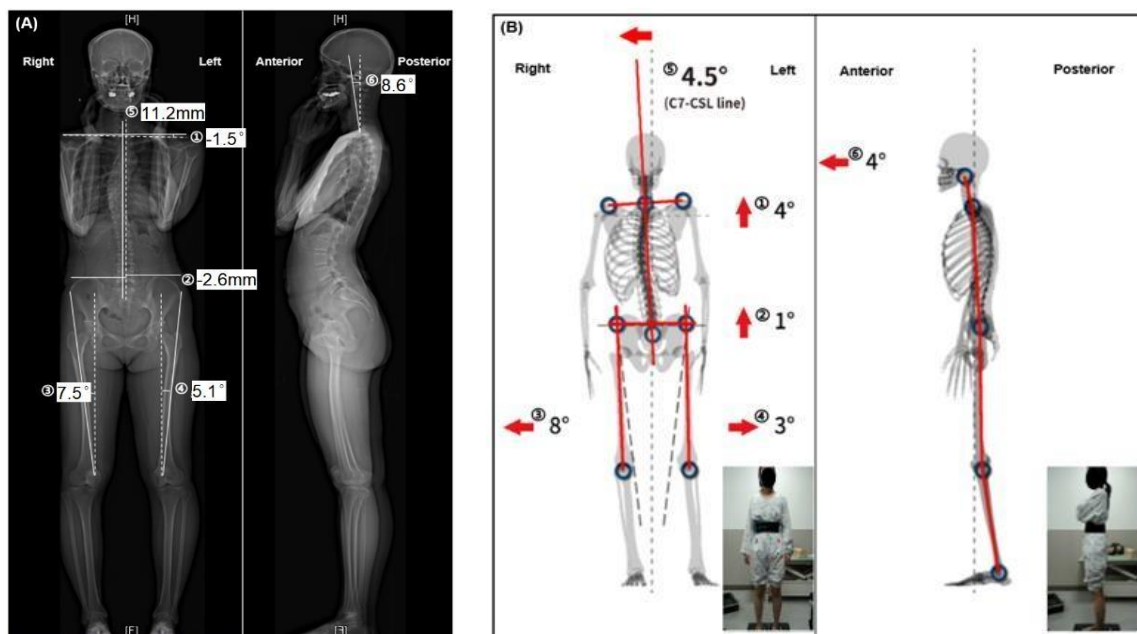


Figure 3.

(A) Données EOS et (B) données PAViR chez un même sujet :

1. Hauteur asymétrique des clavicules
2. Obliquité pelvienne
3. Angle Q du genou droit
4. Angle Q du genou gauche
5. Axe entre la 7e vertèbre cervicale et la ligne sacrée centrale (C7-CSL)
6. Posture de la tête projetée vers l'avant

Tous les paramètres sont exprimés en degrés, à l'exception des paramètres 2 et 5 dans le système EOS, qui sont indiqués en millimètres. Les valeurs négatives indiquent soit une élévation du côté gauche, soit une inclinaison posturale vers la gauche.

Illustration fournie par MG Solutions.

PAViR : dispositif d'analyse posturale et de reconstruction virtuelle.

Les unités de mesure pour la hauteur asymétrique des clavicules, les angles Q bilatéraux et la posture de la tête vers l'avant sont exprimées en degrés. En revanche, les mesures de l'obliquité pelvienne et de l'axe C7-CSL sont exprimées en millimètres.

Cependant, avec le PAViR, l'appareil affiche toutes les données en degrés immédiatement après la capture. Les résultats secondaires comprenaient une comparaison des données entre le PAViR et l'Eos pour en évaluer la validité.

2.5. Analyse des données

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SPSS pour Windows, version 25 (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

Les coefficients de corrélation intraclasse (ICC) et leurs intervalles de confiance à 95 % ont été utilisés pour évaluer la fiabilité intra-observateur du PAViR.

- Un ICC > 0,75 indique une excellente fiabilité,
- Un ICC entre 0,40 et 0,75 une fiabilité moyenne à bonne,
- Un ICC < 0,40 une faible fiabilité [33].

Les relations entre les mesures du PAViR et celles de l'Eos ont été comparées à l'aide d'un test t apparié et d'une analyse de corrélation (coefficient de corrélation de Pearson).

Les coefficients de corrélation de Pearson et les ICC ont été interprétés comme suit [34] :

- Faible : 0,00 à 0,20
- Passable : 0,21 à 0,40
- Modérée : 0,41 à 0,60
- Bonne : 0,61 à 0,80
- Excellente : 0,81 à 1,00

Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$ pour l'ensemble des tests.

3. Résultats

3.1. Résultats des mesures par Eos et PAViR

Les résultats descriptifs des paramètres coronaires et sagittaux mesurés sont présentés dans le Tableau 2.

Les valeurs négatives indiquent soit une élévation du côté gauche, soit une inclinaison posturale vers la gauche.

Une différence significative entre les deux dispositifs a été observée pour les mesures suivantes :

- L'obliquité pelvienne
- Les angles Q bilatéraux
- L'alignement C7-CSL

Avec l'Eos, la plupart des participants présentaient un buste incliné vers la gauche et une tête penchée vers l'avant. Concernant l'angle Q, un seul patient présentait une valeur négative au genou droit.

Tableau 2. Statistiques descriptives des paramètres coronaux et sagittaux mesurés avec les systèmes EOS et PAViR.

		EOS		PAViR	
	Parameters	Mean $\pm$ SD	Range	Mean $\pm$ SD	Range
Coronal view	Asymmetric clavicle height (°)	0.1 $\pm$ 2.8	−8.0 ^a ~16.0	−1.0 $\pm$ 1.6	−5.0~3.8
	Pelvic oblique (mm, °) ^b	−0.3 $\pm$ 5.0	−12.0~14.0	0.7 $\pm$ 1.6 *	−2.6~6.4
	Right Q angle (°)	6.1 $\pm$ 1.7	−1.8~10.4	0.9 $\pm$ 7.9 *	−8.0~14.0
	Left Q angle (°)	5.6 $\pm$ 1.6	0.9~9.8	−3.1 $\pm$ 4.0 *	−7.9~13.5
	C7-CSL (mm, °) ^b	−3.0 $\pm$ 13.3	−59.0~36.0	−1.3 $\pm$ 2.2 *	−8.1~4.3
Sagittal view	Forward head posture (°)	7.0 $\pm$ 6.9	−5.1~29.4	7.9 $\pm$ 6.3	−5.0~29.0

PAViR posture-analyzing and virtual reconstructing device, SD standard deviation, C7-CSL center of 7th cervical vertebra-central sacral line; ^a Negative values mean that the left is raised or that the posture is tilted to the left; ^b All parameters are in degrees except for the pelvic oblique and C7-CSL in the EOS, indicated as distance, millimeter; * $p < 0.05$.

3.2. Fiabilité Intra-Observateur du PAViR

Tous les **coefficients de corrélation intra-observateur** pour les paramètres en **vue coronale** (hauteur asymétrique des clavicules, obliquité pelvienne, angles Q bilatéraux des genoux, C7-CSL) et en **vue sagittale** (posture de la tête projetée vers l'avant) étaient **supérieurs à 0,69**.

Le **paramètre le plus fiable** mesuré par le PAViR était l'**alignement C7-CSL**, avec un **ICC de 0,84**, indiquant une **excellente fiabilité** (voir **Tableau 3**).

Tableau 3. Fiabilité intra-observateur des mesures effectuées avec le PAViR

Parameters	Coefficient Value	p-Value
Asymmetric clavicle height	0.69	0.005
Pelvic oblique	0.72	0.002
Right Q angle of knee	0.72	0.001
Left Q angle of knee	0.79	0.001
C7-CSL	0.84	0.002
Forward head posture	0.76	0.001

PAViR posture-analyzing and virtual reconstructing device, C7-CSL center of 7th cervical vertebra-central sacral line.

3.3. Validation du PAViR par rapport aux paramètres de l'Eos

Les **résultats principaux** ont été comparés afin de **valider le PAViR** pour chacun des paramètres mesurés.

Une **analyse ajustée en fonction de l'âge, de la taille, du poids et de l'indice de masse corporelle (IMC)** a été réalisée.

Parmi les paramètres évalués avec le PAViR, l'**alignement C7-CSL** a montré une **corrélation positive modérée** avec les données de l'Eos ($r = 0,42$, $p < 0,001$).

Les autres paramètres ont présenté des **corrélations positives modérées à faibles** :

- **Posture de la tête projetée vers l'avant** : $r = 0,39$, $p < 0,002$
- **Hauteur asymétrique des clavicules** : $r = 0,37$, $p < 0,002$
- **Obliquité pelvienne** : $r = 0,32$, $p < 0,002$

Ces résultats sont présentés dans le **Tableau 4**.

En revanche, **aucune corrélation significative** n'a été observée pour les **angles Q bilatéraux des genoux** entre les mesures obtenues par **PAViR** et celles issues de l'**Eos**.

Table 4. Tableau 4. Coefficients de corrélation de Pearson (r) évaluant la validité des mesures entre le PAViR et l'EOS.

Parameters	Correlation Coefficient	p -Value
Asymmetric clavicle height	0.37	<0.002
Pelvic oblique	0.32	<0.002
Right Q angle of knee	−0.47	0.14
Left Q angle of knee	−0.15	0.15
C7-CSL	0.42	<0.001
Forward head posture	0.39	<0.002

PAViR posture analyzing and virtual reconstructing device, C7-CSL center of 7th cervical vertebra-central sacral line.

4. Discussion

En tant qu'étude pilote, les paramètres d'asymétrie posturale, utilisés pour diagnostiquer une dysfonction somatique, ont été comparés entre les mesures obtenues par PAViR en vue coronale (hauteur asymétrique des clavicules, obliquité pelvienne, angles Q des genoux, C7-CSL) et en vue sagittale (posture de la tête projetée vers l'avant), et celles obtenues via l'EOS.

Le PAViR, système récemment développé, a démontré une fiabilité intra-observateur allant de bonne à excellente.

En ce qui concerne la validité des mesures, tous les paramètres du PAViR ont présenté une corrélation modérée à acceptable avec ceux de l'EOS, à l'exception de l'angle Q, pour lequel aucune corrélation significative n'a été observée.

Bien que des ajustements aient été effectués pour limiter les interférences dues aux vêtements ou aux cheveux, ainsi que les variations des parties osseuses peu concernées, à l'aide de la méthode géométrique, c'est la mesure C7-CSL — plus simple à capturer car centrée sur la ligne médiane du tronc — qui semble la plus constante et fiable.

À l'inverse, l'angle Q, influencé par les plis du genou et les variations anatomiques, s'avère plus difficile à mesurer de manière fiable.

Pour renforcer la validité des résultats, des études complémentaires seront nécessaires, notamment en incluant des analyses avec différents types de vêtements, voire avec des participants non vêtus, afin de réduire au maximum les interférences.

Par ailleurs, une amélioration technologique du système PAViR reste souhaitable pour optimiser la précision et l'applicabilité clinique.

La dysfonction somatique est définie comme une altération ou un dysfonctionnement des composantes du système somatique (la structure corporelle) [9]. Il ne s'agit pas d'un trouble localisé, mais plutôt du résultat de l'interaction entre plusieurs structures en chaîne.

Cliniquement, les patients peuvent se plaindre de douleurs apparaissant après un mouvement inadapté, une posture prolongée, ou une utilisation excessive des muscles.

La dysfonction somatique est aggravée par une mauvaise posture, ou elle peut en être la conséquence, entraînant alors des mécanismes corporels dysfonctionnels [35].

Parmi les caractéristiques de la dysfonction somatique, l'évaluation de l'asymétrie repose principalement sur une inspection subjective.

Si une évaluation objective pouvait être réalisée à l'aide d'un dispositif quantitatif, un diagnostic plus précis serait alors possible.

Pour comprendre la relation entre les déséquilibres, il serait plus pertinent d'obtenir une image du corps entier plutôt que d'une seule de ses parties.

Dans ce contexte, le système EOS s'impose comme un excellent outil de mesure des déséquilibres posturaux dans le domaine médical actuel [17,36].

Cependant, le système EOS présente également plusieurs limitations [16,19].

Bien que les rayons X et le système EOS offrent une précision élevée, ils ne sont pas adaptés à une utilisation fréquente, notamment tous les quelques jours ou semaines, en raison du risque d'exposition aux radiations et de leur coût élevé.

Une radiographie complète de la colonne vertébrale peut exposer le patient à une dose supérieure à l'exposition annuelle moyenne aux radiations naturelles (2,4 mSv/an).

Ainsi, selon une analyse du rapport bénéfice/risque, il est difficile de justifier une radiographie complète de la colonne pour suivre un traitement, en dehors d'un diagnostic initial.

À l'inverse, une micro-dose EOS unique équivaut à seulement 2,6 μ Sv, soit moins qu'une journée d'exposition naturelle [19].

Malgré cela, l'Eos reste très coûteux, difficile d'accès et complexe à entretenir, ce qui limite son utilisation comme outil d'évaluation de suivi régulier.

La reproductibilité des mesures est cruciale lorsqu'on utilise un outil d'évaluation simple tel que le PAViR.

En effet, un manque de reproductibilité rendrait difficile l'évaluation de l'efficacité des thérapies manuelles, chiropratiques, ostéopathiques ou sportives.

D'autres dispositifs non radiographiques — tels que la biophotogrammétrie, l'analyse du mouvement par infrarouge, le fil à plomb, la souris vertébrale, la topographie de surface ou l'échographie libre à trois points — reposent sur des méthodes mathématiques complexes et des procédures de collecte rigoureuses [14,15].

Les résultats de fiabilité intra-observateur obtenus avec le PAViR dans cette étude se sont révélés bons à excellents pour tous les paramètres mesurés [37].

Les scanners (CT) ou les reconstructions 3D à partir de radiographies biplanaires peuvent également fournir des mesures précises, mais nécessitent un temps de traitement supérieur à 10 minutes et l'intervention d'un opérateur expérimenté.

De plus, le risque d'exposition aux radiations reste présent [38,39].

Certaines méthodes optiques, comme la topographie par franges de Moiré, les techniques de lumière structurée, le système ISIS (Integrated Shape Imaging System), le système Quantec, ou encore le scanner Ortelius, sont utilisées pour détecter les déformations rachidiennes [40–42].

Bien que certains centres les emploient pour surveiller la scoliose, ces appareils sont difficiles à obtenir, nécessitent une manipulation complexe, et obligent les patients à se dévêtir complètement.

De plus, ces dispositifs sont principalement conçus pour évaluer des déformations spécifiques, comme la scoliose, en se limitant à la vue postérieure uniquement.

Ils n'évaluent pas d'autres éléments clés comme la hauteur asymétrique des épaules, l'obliquité pelvienne, les angles Q des genoux ou la posture de la tête vers l'avant.

En revanche, le PAViR utilise une caméra de profondeur 3D pour collecter des données de surface corporelle...

Le système effectue un étalonnage via l'estimation de la posture humaine (Human Pose Estimation, HPE), identifie des points clés spécifiques, puis reproduit la forme de la colonne vertébrale et du squelette.

Les sujets peuvent réaliser le test sans se dévêtir, et les résultats sont disponibles à l'écran ou envoyés par e-mail en moins d'une minute.

Contrairement aux technologies précédemment citées, toutes les étapes du processus étant automatisées, le dispositif peut être utilisé sans intervention humaine.

Ainsi, le système PAViR offre la possibilité d'évaluer la posture squelettique de patients habillés, sans exposition aux radiations.

Contrairement aux méthodes non radiographiques classiques, il s'agit d'une technologie capable d'analyser le

corps entier en temps réel, sans déshabillage, grâce à une approche sans marqueurs basée sur une caméra RGB-D.

Les participants peuvent simplement se placer devant l'appareil et suivre les instructions visuelles, sans qu'un opérateur soit nécessaire, et les résultats peuvent être facilement transmis au personnel médical.

Des études supplémentaires sont cependant nécessaires pour déterminer si ces résultats sont également applicables à d'autres pathologies musculosquelettiques, telles que :

- l'angle de Cobb dans la scoliose,
- la cyphose lombaire dégénérative,
- la rotation pelvienne anormale,
- les jambes arquées (genu varum),
- et les genoux en X (genu valgum).

Limites de l'étude

Cette étude présente certaines limites :

1. Taille de l'échantillon :

Bien que l'analyse de puissance ait démontré la significativité statistique des résultats, en supposant une puissance de 80 %, 29 courbes étaient nécessaires pour chaque sous-groupe, selon le calculateur d'échantillon du logiciel G*Power 3.1.9.4.

L'inclusion d'un plus grand nombre de participants permettrait d'accroître encore la puissance de l'étude.

2. Algorithme encore en développement :

L'algorithme n'est pas encore parfaitement abouti ; il est nécessaire de le mettre à jour en continu par des comparaisons avec le système EOS et à l'aide de technologies de big data.

L'accumulation de données permettra d'améliorer la précision et la corrélation, et de mieux prédire les risques liés aux troubles musculosquelettiques.

3. Variabilité selon la position :

Des variations de position peuvent influencer les valeurs mesurées.

Bien que la tendance générale soit maintenue, davantage de recherches sont nécessaires pour standardiser les postures, ce qui permettrait d'améliorer la précision des comparaisons.

5. Conclusions

Le PAViR présente une excellente fiabilité intra-observateur chez les personnes souffrant de dysfonction somatique.

À l'exception des angles Q, le système montre une validité modérée à acceptable par rapport à l'imagerie diagnostique EOS, en ce qui concerne les paramètres de déséquilibre coronaires et sagittaux.

Bien que le PAViR ne soit pas encore disponible en pratique clinique, il possède le potentiel pour devenir un outil diagnostique sans rayonnement, accessible et économique, après l'ère EOS.

Cette étude offre des perspectives intéressantes pour les chercheurs en santé numérique. Sur la base de cette technologie, davantage de recherches seront nécessaires pour améliorer la précision des algorithmes via le big data, et pour l'appliquer à des patients souffrant de douleurs musculosquelettiques.

Informations supplémentaires

Contributions des auteurs

- Conceptualisation : J.H.P., H.J.L.
- Méthodologie : M.K., S.Y.C., H.E.C.
- Analyse et investigation : H.J.L.
- Rédaction : J.H.P., H.J.L., H.E.C.
- Supervision : J.H.P.

Tous les auteurs ont lu et approuvé la version publiée du manuscrit.

Financement

Cette étude a été financée par une **subvention de recherche facultaire** du **Collège de médecine de l'Université Yonsei** (réf. 6-2021-0090).

Déclaration du comité d'éthique

Cette recherche a été **approuvée par le comité d'éthique** du **Gangnam Severance Hospital**, Séoul, République de Corée (identifiant : 3-2019-0305).

Consentement éclairé

Un **consentement éclairé** a été obtenu de tous les participants pour la **publication d'informations et d'images identifiantes** dans une revue en libre accès.

Disponibilité des données

Toutes les données analysées dans cette étude peuvent être **obtenues auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable**.

Remerciements

Nous remercions **MG Solutions** pour leur **aide dans la création des figures et la partie technique**.

Déclaration de conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent **ne pas avoir de conflit d'intérêts**.

References

1. Raine, S.; Twomey, L. Attributes and qualities of human posture and their relationship to dysfunction or musculoskeletal pain. *Crit. Rev. Phys. Rehabil. Med.* **1994**, *6*, 409.
2. Kamper, D.G.; Fischer, H.C.; Cruz, E.G. Impact of finger posture on mapping from muscle activation to joint torque. *Clin. Biomech. (Bristol Avon.)* **2006**, *21*, 361–369. [\[CrossRef\]](#)
3. Magee, D.J. *Orthopedic Physical Assessment (Musculoskeletal Rehabilitation)*; Saunders: Toronto, Canada, 2014.
4. Pope, P.M. *Severe and Complex Neurological Disability: Management of the Physical Condition*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2007.
5. Läubli, T.; Karpilow, C. *Global Occupational Health*; Oxford university press: Oxford, UK, 2011; pp. 277–299.
6. Takasaki, H.; May, S. Mechanical diagnosis and therapy has similar effects on pain and disability as ‘wait and see’ and other approaches in people with neck pain: A systematic review. *J. Physiother.* **2014**, *60*, 78–84. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Rey-Matias, R.R. 16—Manipulation, Traction, and Massage. In *Braddom’s Rehabilitation Care: A Clinical Handbook*; Cifu, D.X., Lew, H.L., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018; pp. 111–118.e8.
8. Chaitow, L. Chapter 6—Osteopathic Assessment and Treatment of Thoracic and Respiratory Dysfunction. In *Multidisciplinary Approaches to Breathing Pattern Disorders*; Chaitow, L., Bradley, D., Gilbert, C., Ley, R., Eds.; Churchill Livingstone: Edinburgh, Scotland, 2002; pp. 131–172.
9. Williams, N. Managing back pain in general practice is osteopathy the new paradigm? *Br. J. Gen. Pract.* **1997**, *47*, 653–655.
10. Muller, R.; Linz, W.; Buchmann, J. Manual medicine—a powerful “hands on” facility to treat somatic and segmental dysfunction with musculoskeletal pain, increased muscle tension, restrictions of fascia and posture asymmetries. *MMW Fortschr. Med.* **2011**, *153*, 27–30.
11. Fortin, C.; Ehrmann Feldman, D.; Cheriet, F.; Labelle, H. Clinical methods for quantifying body segment posture: A literature review. *Disabil. Rehabil.* **2011**, *33*, 367–383. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Lim, Y.Z.; Chou, L.; Au, R.T.M.; Seneviwickrama, K.L.M.D.; Cicuttini, F.M.; Briggs, A.M.; Sullivan, K.; Urquhart, D.M.; Wluka, A.E. People with low back pain want clear, consistent and personalised information on prognosis, treatment options and self-management strategies: A systematic review. *J. Physiother.* **2019**, *65*, 124–135. [\[CrossRef\]](#)
13. Legaye, J. Follow-up of the sagittal spine by optical technique. *Ann Phys Rehabil Med* **2012**, *55*, 76–92. [\[CrossRef\]](#)
14. Cohen, L.; Kobayashi, S.; Simic, M.; Dennis, S.; Refshauge, K.; Pappas, E. Non-radiographic methods of measuring global sagittal balance: A systematic review. *Scoliosis Spinal Disord.* **2017**, *12*, 30. [\[CrossRef\]](#)
15. Furlanetto, T.S.; Sedrez, J.A.; Candotti, C.T.; Loss, J.F. Photogrammetry as a tool for the postural evaluation of the spine: A systematic review. *World J. Orthop.* **2016**, *7*, 136–148. [\[CrossRef\]](#)
16. Dubousset, J.; Charpak, G.; Dorion, I.; Skalli, W.; Lavaste, F.; Deguise, J.; Kalifa, G.; Ferey, S. A new 2D and 3D imaging approach to musculoskeletal physiology and pathology with low-dose radiation and the standing position: The EOS system. *Bull. De L’academie Natl. De Med.* **2005**, *189*, 287–297; discussion 297.
17. Somoskeöy, S.; Tunyogi-Csapó, M.; Bogyó, C.; Illés, T. Accuracy and reliability of coronal and sagittal spinal curvature data based on patient-specific three-dimensional models created by the EOS 2D/3D imaging system. *Spine J.* **2012**, *12*, 1052–1059. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Deschenes, S.; Charron, G.; Beaudoin, G.; Labelle, H.; Dubois, J.; Miron, M.C.; Parent, S. Diagnostic imaging of spinal deformities: Reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. *Spine (Phila Pa 1976)* **2010**, *35*, 989–994. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
19. Hui, S.C.N.; Pialasse, J.-P.; Wong, J.Y.H.; Lam, T.-p.; Ng, B.K.W.; Cheng, J.C.Y.; Chu, W.C.W. Radiation dose of digital radiography (DR) versus micro-dose x-ray (EOS) on patients with adolescent idiopathic scoliosis: 2016 SOSORT- IRSSD “John Seavast Award” Winner in Imaging Research. *Scoliosis Spinal Disord.* **2016**, *11*, 46. [\[CrossRef\]](#)
20. Wall, B.F. *Ionising Radiation Exposure of the Population of the United States: NCRP Report no. 160*; Oxford University Press: Oxford, UK, 2009.
21. Metaxas, V.I.; Messaris, G.A.; Lekatou, A.N.; Petsas, T.G.; Panayiotakis, G.S. Patient Doses in Common Diagnostic X-ray Examinations. *Radiat. Prot. Dosim.* **2019**, *184*, 12–27. [\[CrossRef\]](#)
22. Kim, H.; Lee, S.; Lee, D.; Choi, S.; Ju, J.; Myung, H. Real-time human pose estimation and gesture recognition from depth images using superpixels and SVM classifier. *Sensors* **2015**, *15*, 12410–12427. [\[CrossRef\]](#)
23. Straka, M.; Hauswiesner, S.; Rüther, M.; Bischof, H. Skeletal Graph Based Human Pose Estimation in Real-Time. In Proceedings of the British Machine Vision Conference, Dundee, UK, 29 August–2 September 2011; pp. 1–12.
24. Achilles, F.; Ichim, A.-E.; Coskun, H.; Tombari, F.; Noachtar, S.; Navab, N. *Patient MoCap: Human Pose Estimation under Blanket Occlusion for Hospital Monitoring Applications*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016; pp. 491–499.
25. Faro, F.D.; Marks, M.C.; Pawelek, J.; Newton, P.O. Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* **2004**, *29*, 2284–2289. [\[CrossRef\]](#)
26. Garg, B.; Mehta, N.; Bansal, T.; Malhotra, R. EOS(R) imaging: Concept and current applications in spinal disorders. *J. Clin. Orthop. Trauma* **2020**, *11*, 786–793. [\[CrossRef\]](#)
27. Pumberger, M.; Schmidt, H.; Putzier, M. Spinal Deformity Surgery: A Critical Review of Alignment and Balance. *Asian Spine J.* **2018**, *12*, 775–783. [\[CrossRef\]](#)
28. Vergari, C.; Skalli, W.; Clavel, L.; Demuyneck, M.; Valentin, R.; Sandoz, B.; Similowski, T.; Attali, V. Functional analysis of the human rib cage over the vital capacity range in standing position using biplanar X-ray imaging. *Comput. Biol. Med.* **2022**, *144*, 105343. [\[CrossRef\]](#)
29. Vinod Gutta, E.D.L. Natalie Baddour, Pascal Fallavollita, A Comparison of Depth Sensors for 3D Object Surface Reconstruction. In *The Canadian Medical and Biological Engineering Society; CMBES/SCGB*; Ottawa, ON, Canada, 2019; Volume 42.

30. Jang, C.W.; Park, J.; Cho, H.E.; Park, J.H. Appraisal of the new posture analyzing and virtual reconstruction device (PAViR) for assessing sagittal posture parameters: A prospective observational study. *Int. J. Env. Res. Public Health* **2022**, *19*, 11109. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Camplani, M.; Salgado, L. Background foreground segmentation with RGB-D Kinect data: An efficient combination of classifiers. *J. Vis. Commun. Image Represent.* **2014**, *25*, 122–136. [[CrossRef](#)]
32. Achanta, R.; Shaji, A.; Smith, K.; Lucchi, A.; Fua, P.; Susstrunk, S. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **2012**, *34*, 2274–2282. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Fleiss, J.L.; Levin, B.; Paik, M.C. *Statistical Methods for Rates and Proportions*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2013.
34. Campos, S.; Zhang, L.; Sinclair, E.; Tsao, M.; Barnes, E.A.; Danjoux, C.; Sahgal, A.; Goh, P.; Culleton, S.; Mitera, G. The palliative performance scale: Examining its inter-rater reliability in an outpatient palliative radiation oncology clinic. *Support. Care Cancer* **2009**, *17*, 685–690. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Kasten, K.M.; Lewis, D.D. High-Velocity, Low-Amplitude Management of Posterior Rib Somatic Dysfunction. *J. Am. Osteopath. Assoc.* **2020**, *120*, e1–e2. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Rousseau, M.-A.; Brusson, A.; Lazennec, J.-Y. Assessment of the axial rotation of the pelvis with the EOS® imaging system: Intra-and inter-observer reproducibility and accuracy study. *Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol.* **2014**, *24*, 891–895. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Cicchetti, D.V. Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychol. Assess.* **1994**, *6*, 284. [[CrossRef](#)]
38. Humbert, L.; De Guise, J.A.; Aubert, B.; Godbout, B.; Skalli, W. 3D reconstruction of the spine from biplanar X-rays using parametric models based on transversal and longitudinal inferences. *Med. Eng. Phys.* **2009**, *31*, 681–687. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Kösling, S.; Dietrich, K.; Steinecke, R.; Klöppel, R.; Schulz, H.-G. Diagnostic value of 3 D CT surface reconstruction in spinal fractures. *Eur. Radiol.* **1997**, *7*, 61–64. [[CrossRef](#)]
40. Hocquet, A.; Cornelis, F.; Jirrot, A.; Castaings, L.; de Sèze, M.; Hauger, O. Patient-specific 3D models created by 3D imaging system or biplanar imaging coupled with Moiré-Fringe projections: A comparative study of accuracy and reliability on spinal curvatures and vertebral rotation data. *Eur. Spine J.* **2016**, *25*, 3154–3161. [[CrossRef](#)]
41. Daruwalla, J.; Balasubramaniam, P. Moiré topography in scoliosis. Its accuracy in detecting the site and size of the curve. *J. Bone Joint Surg. Br. Vol.* **1985**, *67*, 211–213.
42. Berryman, F.; Pynsent, P.; Fairbank, J.; Disney, S. A new system for measuring three-dimensional back shape in scoliosis. *Eur. Spine J.* **2008**, *17*, 663–672. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.