褥瘡予防を目的としたベッド上の体動検知システムの開発

電気・化学専攻　医用工学領域　2281236　黒島　葵
(主査：和多田　雅哉 教授　副査：京相　雅樹 教授，小林　千尋 講師)

1. 緒言

日本褥瘡学会によって，褥瘡は「身体に加わった外力は骨と皮膚表層の間の軟部組織の血流の低下，あるいは停止させる。この状況が一定時間持続されると組織は不可逆的な阻血性障害に陥り褥瘡となる」と定義される[1]。症状は，重症度により皮膚の一部に発赤から，皮膚下の脂肪や筋肉組織が壊死し自己融解による骨の露出まである。褥瘡の予防方法のひとつとして，体位変換が挙げられる。体位変換とは，「ベッド，椅子などの支持体と接触しているために体重がかかって圧迫されている身体の部位を，身体が向いている方向，挙頭の角度，身体の格好，姿勢などを変えることによって移動させることをいう」[2]。一般的に，長時間の同一箇所にかかる圧迫を解消するために 2 時間以内の間隔で体位変換を行うことが推奨されている[3]。褥瘡予防や治療で扱われる計測機器には，一般的に体表面接触圧を計測する圧力あるいは加速度センサを用いる。しかし，身体に接触するため失禁による機器の故障や体圧分散寝具使用時には計測不可等の問題が挙げられ，医療や介護現場における常時計測に不向きである。そこで，本研究では非接触型の近赤外線カメラ Azure Kinect DK(Microsoft 社，以下 Kinect)を用いた体動検知を行う。

本研究では褥瘡予防を目的とし，ベッド上の体動検知システムを開発する。長時間同姿勢を防ぐために介助者に対象者の体位を提示し圧力がかかっている個所を明確化し，体位変換を促す。したがって，ベッド上での姿勢推定による体位判定から自力での体位変換の有無を評価する。対象者が長時間体位変換を行わなかった場合，介助者に警告を送ることで体位変換を促すことが可能である。

本報告では，提案する体動検知システムの開発および姿勢推定による解析から体位判定の有効性の検討を行った。

2. 開発した体動検知システム

2.1 コンセプト

1 台の非接触型センサを用いて，姿勢推定されて得た 3 次元の骨格座標から体位判定を行い，体位変換の有無および身体とベッドとの接触箇所の可視化を行う。体位判定には，仰臥位と側臥位の姿勢に着目した方法を提案する。精度を向上させるために，複数の体位変換評価方法を提案し正解率が高い組み合わせを採用する。今回は，面積と角度による評価を提案する。30 min ごとに介助者にベッドとの接触箇所を色付けた画像を送付し，一定時間，体位変換を行わなかったと判断した場合は警告テキストを送付する。また，本システムでは毛布(厚み 1[cm])未満の使用有無関わらず使用可能を目標とする。

図 1，2 に，システムフロー，各体位のモデルオブジェクトに配置した接触箇所のオブジェクトを示す。Kinect から得た姿勢推定された骨格データを映像出力と体位判定に用い

る，$t_{judging}$ min ごとに体位判定より仰臥位または側臥位を判定する。体位判定の結果を基に，$t_{rolling}$ min 以内に体位変換が行われているのか判定を行う。$t_{rolling}$ min は，体位変換間隔の推奨時間 120 min とする。誤判定を防ぐために，体位変換検知後の姿勢を $2t_{judging}$ min 以上継続した場合のみ体位変換有と判定する(誤判定防止フロー)。体位変換無の場合，体位に合わせて身体とベッドとの接触箇所を表示し，時間毎に 60 min で緑色，90 min で黄色，120 min で赤色と変化させる。Unity 上のゲームビューのスクリーンショットを JPEG 画像に生成し，30 min ごとに任意の伝達システムを用いて介助者に送付する。体位変換を行うように促すテキストは，体位変換未実施 120 min 継続時に送付する。

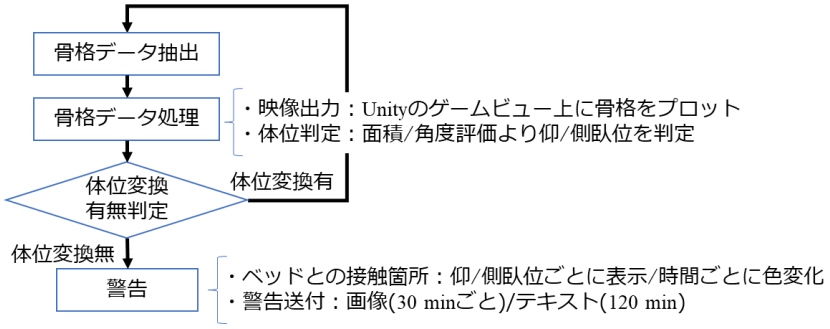

図 1　システムフロー

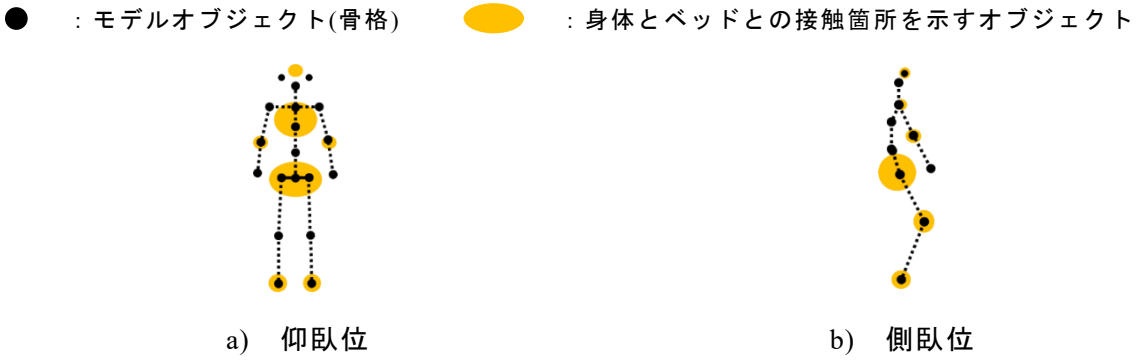

図 2 各体位のモデルオブジェクトに配置した接触箇所のオブジェクト

2.2 体位判定(面積/角度)

体位変換有無を判定するために，t[s]時の体位を判定する。対象とする体位は仰臥位と側臥位であり，定義として仰臥位は仰向けに寝た姿勢，側臥位は横向けに寝た姿勢である。なお，伏臥位は，呼吸確保のために行われない体位であるため，対象体位から外した。本研究では，側臥位を褥瘡予防に有効な姿勢である 30 deg 側臥位を含むものとし，身体とベッドとの角度が 30 deg のときを閾値として，30 deg 以上を側臥位，30 deg より下回るときを仰臥位とする。

体位判定の方法として，Kinect から得た骨格座標のデータを基に面積と角度から評価する方法を提案する。体位判定の判定間隔 $t_{judging}$ min ごとに実施する。

2.2.1 面積評価

肩峰部 2 点と臀部 1 点からなる三角形を形成する。カメラ平面(XY 平面)に投射された三角形の体位ごとの面積変化に着目した。これを利用して，カメラ平面から見た面積と冠状面(XYZ 平面)における三角形の面積を比較し，体位変換の有無を評価可能と

する。図 3 に選定した三角形を示す。

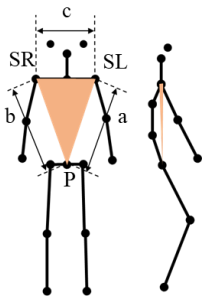

図 3　選定した三角形

図 3 より，Kinect から臀部(P: Pelvis)，左肩(SL: ShoulderLeft)，右肩(SR: ShoulderRight)の 3 点の X，Y，Z 座標を取得する。臀部と左肩との XY 距離をa，臀部と右肩との XY 距離をb，左肩と右肩との XY 距離をc，補助的変数をsとした際，ヘロンの公式を用いて三角形の面積Sは式(1)となる。

$$S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \ (\text{ただし，} \ s = \frac{a+b+c}{2}) \tag{1}$$

S:三角形の面積[cm^2]　s:補助的変数　a:臀部と左肩との XY 距離[cm]

b:臀部と右肩との XY 距離[cm]　c:左肩と右肩との XY 距離[cm]

一方，冠状面における三角形 T は，外積を用いて式(2)となる。

$$T = \frac{1}{2}\sqrt{\left|\overrightarrow{PSR}\right|^2\left|\overrightarrow{PSL}\right|^2 - (\overrightarrow{PSR}\cdot\overrightarrow{PSL})^2} \tag{2}$$

以上から求めたカメラから見た三角形と冠状面における三角形との面積の割合が以下の閾値以上のときを側臥位，より下回るときを仰臥位とする。閾値は，側臥位(30 deg)とし，以下の方法で算出する。図 4 に，XY 平面に投射される肩幅の算出を示す。

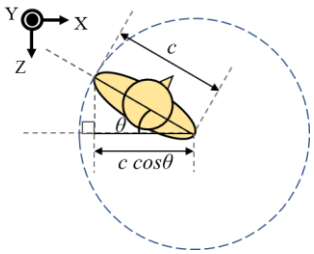

図 4 XY 平面に投射される肩幅の算出

なお，XY 平面において，臀部と両肩の最短距離 h は仰臥位(0 deg)と側臥位(30 deg)において微小な変化であるため，加味しないものとする。このとき，カメラから見た三角形の面積 S と冠状面における三角形の面積 T の比は式(3)のようになる。

$$\frac{S}{T} = \frac{\frac{1}{2}r\cos\theta\cdot h}{\frac{1}{2}r\cdot h} = \cos\theta \tag{3}$$

$\theta = 30\,\text{deg}$ のとき

$$cos\theta = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

解析方法は，以下の 2 通りを検討する。式(2)を用いて基準とする側臥位(30 deg)時の面積を以下の冠状面における三角形の面積にそれぞれ掛け合わせて算出する。

① 0[s]時の冠状面における三角形の面積

② t[s]時の冠状面における三角形の面積

2.2.2 角度評価

肩峰部 2 点と臀部 2 点からなる Body 平面と Bed 平面との位置関係を求める。しかし，体位変換時に肩甲骨または骨盤先行によるねじれが生じる可能性があるため，取得した 4 点から 3 点ずつ選択し 4 つの Body 平面を形成する。それぞれの平面の法線ベクトルを外積から算出する。法線ベクトルの内積を用いて形成した 4 つの Body 平面と Bed 平面との角度を算出し，閾値を用いて体位変換の有無を評価する。閾値は，臨床現場で用いられる殿筋で身体を支える体位の 30 度側臥位を基に設定した。図 5，6 に，法線ベクトルの設定，Body 平面の選定を示す。

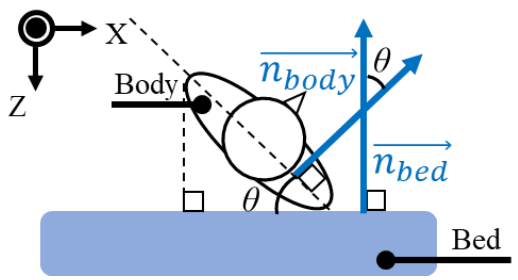

図 5　法線ベクトルの設定

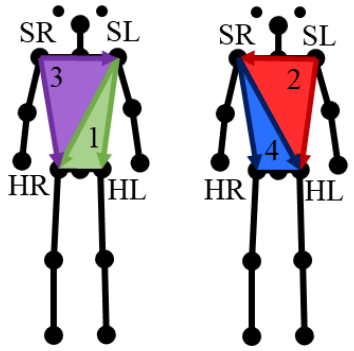

図 6　Body 平面の選定

図 5 より，Kinect から左肩(ShoulderLeft)，右肩(ShoulderRight)，左臀部(HipLeft)，右臀部(HipRight)の 4 点から X，Y，Z 座標を取得する。次に，4 つの Body 平面の法線ベクトル$\overrightarrow{n_{body}}$をそれぞれ外積を用いて，

$$\overrightarrow{n_{body1}} = \overrightarrow{SLHR} \times \overrightarrow{SLHL} \qquad \overrightarrow{n_{body2}} = \overrightarrow{SLSR} \times \overrightarrow{SLHL}$$
$$\overrightarrow{n_{body3}} = \overrightarrow{SRSL} \times \overrightarrow{SRHR} \qquad \overrightarrow{n_{body4}} = \overrightarrow{SRHL} \times \overrightarrow{SRHR} \tag{2-5}$$

2 平面がなす角度θ(0 [deg]≦θ≦180 [deg])は内積を用いて

$$\cos\theta = \frac{\overrightarrow{n_{body}} \cdot \overrightarrow{n_{bed}}}{|\overrightarrow{n_{body}}||\overrightarrow{n_{bed}}|} \tag{6}$$

算出した 4 つの値のうち 3 つ以上，以下の範囲の場合に側臥位と判断する。

$$\cos\theta \leqq \frac{\sqrt{3}}{2} \ (30\ [\mathrm{deg}] \leqq \theta \leqq 150[\mathrm{deg}])$$

3. 本システムの有用性検証実験

3.1 測定環境

使用機器は，Kinect(Azure Kinect DK，Microsoft 社，型番: 1880) 1 台，スーパークランプ 1 個, PC 1 台, ケーブル(電源用, データ用 Type-C to Type-A), ベッド(180×70[cm])

2 台，枕(40×70 cm)である。表 1，2 に Kinect の仕様，使用 PC のスペック，図 7 に実験概要を示す。図 6 より，Kinect をベッド全体(180×140[cm])が撮影可能となるようにベッドの上部 224[cm]の高さで固定し，ベッド平面と垂直にした。また，表 3 に被験者情報を示す。

表 1　Kinect の仕様

Depth Mode (NFOV Unbinned)	解像度[px]	640×576
	視野角[deg]	75×65
	動作範囲[m]	0。5 - 3。86
	露出時間[ms]	12。8
FPS[fps]	30	
反応率[%]	15 – 95 @850[nm]	
画素ピッチ[μm]	3。5×3。5	

表 2　PC のスペック

PC	FX516P
CPU	11 th Gen Intel(R) Core i5-11300H 3。10 GHz 3。11 GHz
RAM	16。0 GB
OS	Windows 10 Home
GPU	NVIDIA GeForce RTX™ 3060

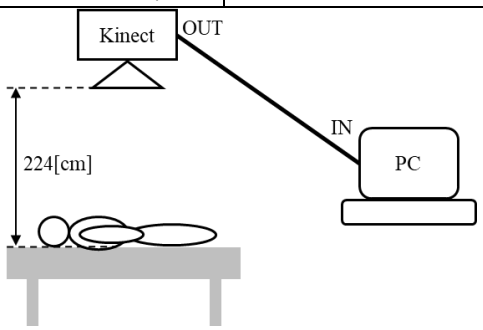

図 7　実験概要

表 3 被験者情報

	性別	年齢 [age]	身長 [cm]	肩幅 [cm]
A	男性	24	175	40
B	男性	25	164	44
C	女性	24	150	37
D	女性	25	156	37

3.2 実験目的

120 min 間，姿勢指定なく寝た場合の本システム内の体位判定および体位変換有無判定の有用性について検討する。また，面積評価においては冠状面における三角形の面積の取得箇所の違いによる正解率の違いを比較する。

3.3 実験方法

測定時間は 120 min とし，被験者への測定姿勢の指示は無しとした。被験者の動きは目視による観察を行い，体位と分数を記録した。サンプリング周波数は 1[Hz]とし測定を行い，体位判定および体位変換有無判定の判定間隔 t_{judging} min は 10 min で行った。また，毛布は無し，枕有りで行った。被験者は表 3 より 4 名(A，B，C，D)で行った。解析には 2。2 で示した方法を用いて，評価方法は被験者の動きを基に体位判定した結果との正誤判定とした。

4. 結果

測定時間 120 min，判定間隔 t_{judging} min が 10 min のとき，判定回数は全 13 回である。

4.1 体位判定の有用性

表 4 に，仰臥位/側臥位における各解析方法による正解率を示す。被験者 A，D の体動回数は多く，被験者 B，C の体動回数は少なかった。

表 4 仰臥位/側臥位における各解析方法による正解率

被験者	面積評価				角度評価	
	① 0[s]		② t[s]			
	仰臥位	側臥位	仰臥位	側臥位	仰臥位	側臥位
A(体動多)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
B(体動少)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
C(体動少)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
D(体動多)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

4.2 体位変換有無判定の有用性

表 5 に，体位変換有無判定の結果を示す。

表 5 体位変換有無判定の結果

被験者	体位変換実施数	体位変換有判定数 (誤判定防止フロー無)	体位変換有判定数 (誤判定防止フロー有)
A(体動多)	22	8	2
B(体動少)	3	3	3
C(体動少)	2	2	2
D(体動多)	12	8	2

4.3 内訳

被験者 4 人から，体動が多かった被験者 A と体動が少なかった被験者 B の内訳を示す。図に，目視による計測結果のタイムライン，体位による面積量変化および角度変化をそれぞれ示す。

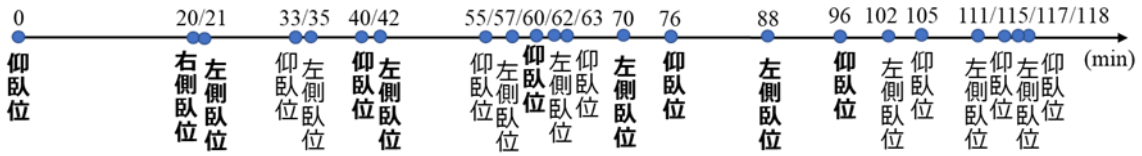

図 8 目視による計測結果のタイムライン(被験者 A)

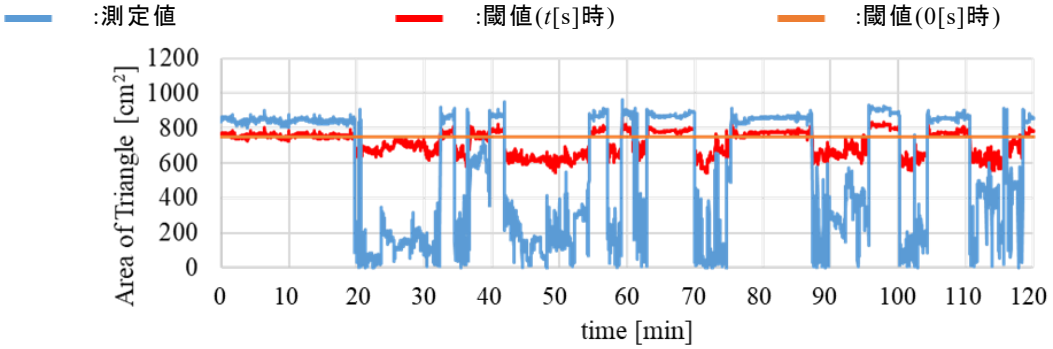

図 9 体位による面積量変化(被験者 A)

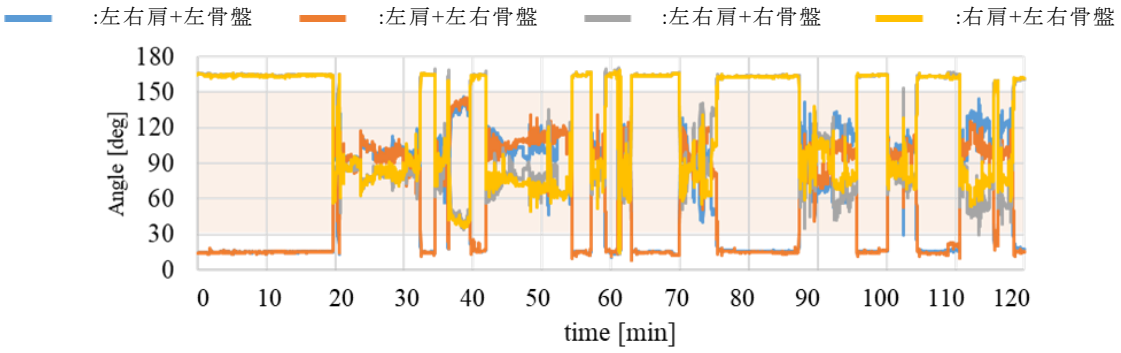

図 10 体位による角度変化(被験者 A)

図 11 目視による計測結果のタイムライン(被験者 B)

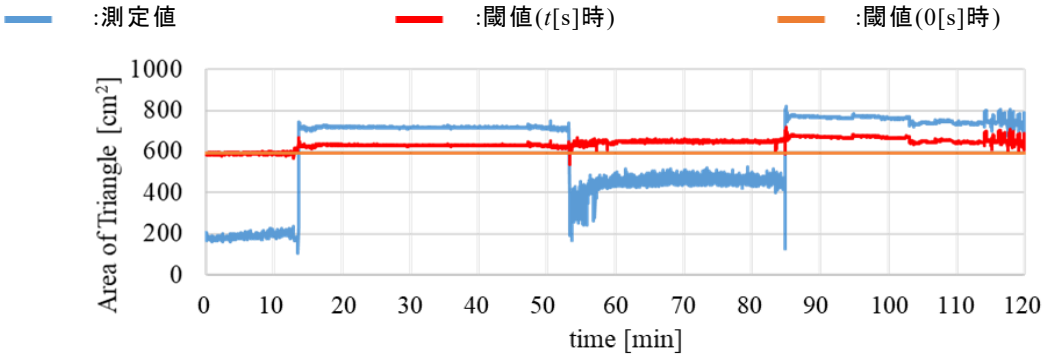

図 12 体位による面積量変化(被験者 B)

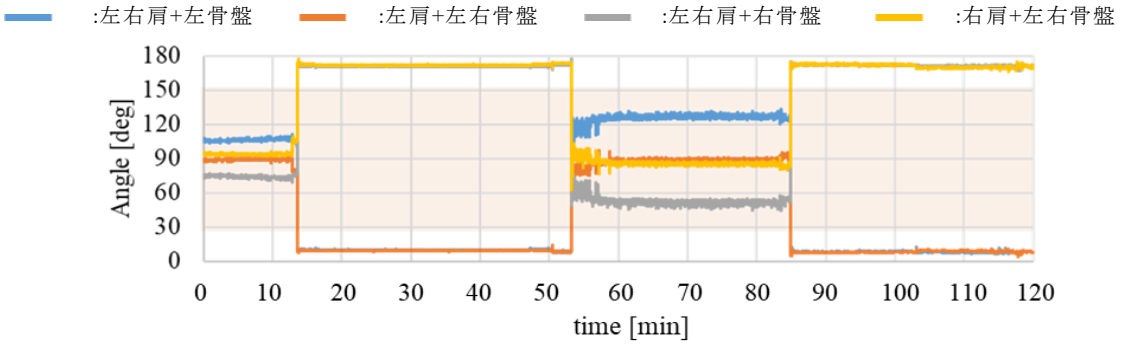

図 13 体位による角度変化(被験者 B)

5. 考察

5.1 体位判定の有用性

表 4 より，被験者の体格差および体動の多さに関係なく提案した面積および角度評価の正解率は 100 %を満たした。体動が少ない場合(被験者 B，C)，面積評価において

はどちらの閾値の取り方も評価可能であり，角度評価は 4 平面ともに実際の体位と判定が一致し評価可能である。体位判定間隔 t_{judging} min が 10 min の間に 2 回以上体位変換を実施した場合(被験者 A，D)，体位判定実施直前の体位判定のみ体位判定の結果に反映された。これによって，遅延なくリアルタイムで判定可能であることが分かった。また，図 8-10，11-13 より被験者 A，B ともに内訳が示す体位と実際の体位は一致しているため，体位判定間隔 10 min 以外でも判定可能であると考えられる。

5.2 体位変換有無判定の有用性

表 5 より，誤判定防止フローによって体動の多さで本来の誤判定防止フロー無場合の結果よりも体位変換有と判定した回数が少なかった。これは体動が多かった被験者 A, D が体位判定間隔の間に体位変換を 2 回以上実施したことや繰り返し体位変換を行ったことで誤判定防止フローによって誤判定とみなされ，体位変換無と判定したことが原因だと考えられる。一方，体動が少なかった被験者 B，C は体位変換の実施間隔が $2t_{\mathrm{judging}}$ min である 20 min を超えていたため体位変換有と判定された数と実施数が一致したと考えられる。以上から，誤判定防止フローを破棄し，別の方法を検討する必要がある。誤判定の判定基準の変更や体位変換の速度から外れ値を算出して体位判定を行う方法等が挙げられる。

6. 結言

本稿にて，提案する体動検知システムの開発および姿勢推定による解析から体位判定の有効性の検討について述べた。本研究では，姿勢推定から得られた骨格データから特徴量(面積/角度)を算出し仰臥位と側臥位の体位を判定することで，体位変換の有無を評価し長時間の同一姿勢を防ぐことを目指した。面積評価においては，臀部 1 点と肩峰部 2 点の 3 点から三角形を形成し，体位によるカメラ平面上に投影される面積の大きさの違いから評価を行った。角度評価においては，肩峰部 2 点と臀部 2 点からそれぞれ 4 平面の身体面とベッド面との角度を求めることによって体位を検討した。結果として，提案した体位判定の評価方法はどちらも有用であった。また，体位変換有無判定においては，誤判定防止フローによって体動が多い場合体位変換無と判定されてしまったため，誤判定の判定基準の見直しや外れ値の算出を行い精度向上が必要である。以上より，本研究で提案した面積および角度評価によって体位を判定することは可能であり，体位変換においては体動が少ない場合のみ判定可能である。

今後の展望としては，今回は Kinect 1 台を使用して行ったため毛布有の場合の正解率は毛布無に比べ下がるため，Kinect を 1 台増やして別角度から計測または OpenPose 等を用いてテストデータを記憶させ特徴点抽出を行うことで正解率が向上すると考えられる.

参考文献

[1] 一般社団法人日本褥瘡学会，科学的根拠に基づく褥瘡局所治療ガイドライン，pp。 112-113，照林社，2005.

[2] 一般社団法人日本褥瘡学会，”日本褥瘡学会で使用する用語の定義・解説”, https://www.jspu.org/medical/glossary/，2023/07/06.

[3] 日本褥瘡学会教育委員会ガイドライン改訂委員会, 褥瘡予防･管理ガイドライン(第 4 版), 褥瘡会誌，Vol. 17，No. 4，pp. 487-557，2015.