

ウェアラブルセンサを用いた腕動作の仮想空間適用

平館侑樹^{†1} 細川靖^{†1} 土井章男^{†2} 高田豊雄^{†2}

海女の動作の仮想空間での可視化を行い、自身の仮想空間内での直感的な操作のためにはウェアラブルセンサを用いて腕動作の測定が必要となる。本研究では小中学生を対象にした海女仮想体験学習システムへの応用を想定し、体験を容易にするために2つのセンサにより、腕動作を仮想空間内に反映する方法を提案する。また、直感的操作を可能にするために腕動作の判定法を提案する。さらにシステム体験後のアンケート調査によりシステムの評価を行った。

Apply the arm motion to the virtual space using wearable sensor

YUKI HIRADATE^{†1} YASUSHI HOSOKAWA^{†1}
AKIO DOI^{†2} TOYOO TAKATA^{†2}

We need to visualize the female diver's motion in virtual space and measure the arm motion using wearable sensor for the controlling intuitive in the virtual space. In this study, we assume application to female diver experiment system for elementary school student. And we propose the way to apply the arm motion using two sensor to the virtual space for ease to experience. And, we propose the judging method of the arm motion to allow an intuitive operation. In addition we have evaluated the system by the questionnaire survey.

1. はじめに

仮想空間内ではマウスやキーボードを使用しての操作に比べ、自身の体の動作に連動した方が直感的な操作が可能となる。これまで、モーションキャプチャを用いて仮想空間に動作を再現する研究 [1] や、慣性センサを用いてバイオリンの運弓動作を測定し練習を支援する研究 [2] など、動作を可視化する研究が多く行われており、動作を可視化することは複雑な動作の学習の助けとなっている。

現在、三陸地域において小中学生が安全に水産業を学ぶ機会は少なく、岩手県久慈市小袖海岸で今も活躍する北限の海女では後継者不足などの問題が深刻化している。その北限の海女への興味関心を喚起するため、我々の研究室では仮想空間内で、海女のウニ漁を体験する海女仮想体験学習システム「海女 via-W」を試作してきた [3]。前述のように、動作を可視化する研究は行われてきたが、海女の動作を可視化する研究はされていない。そのため、本研究では海女の動作を可視化し、小中学生を対象にした海女仮想体験学習システムへの応用を想定する。そのシステムのために、センサを装着して体験を容易にしつつ、腕動作を仮想空間内に適用する方法を提案する。

2. 研究の目的

小中学生を対象とした海女仮想体験学習システム「海女

via-W」では海女の泳ぎ方を教えるためにスライドを用いていた。しかし、スライドは静止画のため、動作の理解が難しい。そのため、本研究では海女の3次元モデル（以下、海女モデルと略す）をモーションキャプチャにより可視化して動作させ、海女の泳ぎ方の理解を容易にする。また、仮想空間内での自身の動作がわからないと海女の動作と合っているか確認できない。そのため、2つのウェアラブルセンサを用いて自分の腕動作を仮想空間内の海女モデルに適用することで可視化する。さらに、腕動作の判定を行うことで直感的操作を可能にし、学習を容易にすることを目的とする。

また、システムの評価のために小中学生を対象とした科学イベントにて試作システムを用いて体験学習を実施し、アンケート調査を行う。

3. 海女仮想体験学習システム

現在、三陸地域において小中学生が安全に水産業を学ぶ機会は少なく、岩手県久慈市小袖海岸で今も活躍する北限の海女では後継者不足などの問題が深刻化している。

そこで我々の研究室では海女の潜水文化や海産物採取体験・学習できるシステムとして「海女 via-W」を開発してきた。海女の漁を実際に体験するのは危険であるため、仮想現実を用いることで安全に体験が可能となる。海女の漁の仮想体験を通じて、小中学生の北限の海女への興味関心を喚起することを目的としている。

「海女 via-W」はヘッドマウンドディスプレイ（以下、HMD と略す）に仮想空間内の海の映像を表示し、手の甲

^{†1} 八戸工業高等専門学校
National Institute Technology, Hachinohe College

^{†2} 岩手県立大学
Iwate Prefectural University

に付けた慣性センサによって、立位で手掌を地面に対して垂直に伸ばした状態で水を後方に押し出すように腕を回す動き（以下、水掻き動作と略す）を検出し、海中を泳ぐように移動する。また、手掌に装着したデータグローブにより指の動きを認識して海産物の取得を行う。ウェアラブルセンサは、Trivisio 社の「Colibri」を使用する。「Colibri」は3軸加速度計と3軸ジャイロスコープを内蔵したセンサで、動作速度は最大 100Hz である。

「海女 via-W」の流れを図 1 に示す。



図 1 「海女 via-W」の流れ
Figure 1 Flow of "Ama via-W".

図 1 に示しているように、「4」泳ぎ方の説明」では、スライドを用いて泳ぎ方の説明をしている。しかし、スライドでは腕の動きがわかりにくいため、泳ぎの練習が十分にできないという問題がある。

4. 腕動作の仮想空間適用

本研究では小中学生を対象とした海女仮想体験学習システムのために腕動作を仮想空間へ適用する。センサにより腕の関節角度を測定し、その結果を海女モデルへ割り当てることで腕動作を仮想空間へ適用する。図 2 に使用する海女モデルを示す。



図 2 使用する海女モデル
Figure 2 Using female diver model.

4.1 測定方法

本研究では腕動作を測定する方法として、カメラを用いてモーションキャプチャする方法とウェアラブルセンサを腕に直接装着する方法を採用する。

4.1.1 ウェアラブルセンサ

学習者の腕動作をリアルタイムで適用するために、ウェアラブルセンサを複数用いる。

腕の関節角度を測定するために、「Colibri」を用いる。

「Colibri」には測定した加速度と角加速度からセンサの傾きを計算する API が用意されているため、この傾きを用いて腕の関節角度を測定する。測定する腕を上腕、前腕、手の3つのリンクと7自由度のモデルだと考える。すると、3個の「Colibri」が必要となる。しかし、本システムは小中学生を対象としているため、使用するセンサの数を減らし、装着を容易にする必要がある。そのため、「Colibri」を手の甲と肘の2ヶ所に1つずつ着脱式で装着する。システム構成を図 3 に示す。

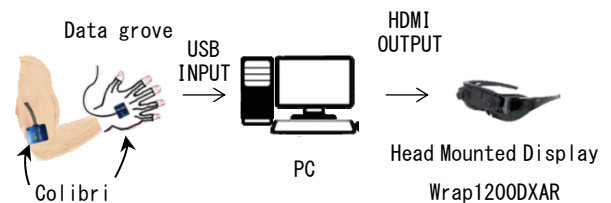


図 3 システム構成
Figure 3 System configuration.

順運動学を基に学習者の各関節の角度をセンサ値から求め、仮想空間内の海女モデルの関節角度に割り当てることで腕動作を仮想空間に適用する。本研究では手の甲と肘に装着した2つの「Colibri」の傾き (yaw, pitch, roll) から腕の各関節の角度を算出する。上腕 (L_1)、前腕 (L_2)、手 (L_3) を図 3 に示すように定義する。

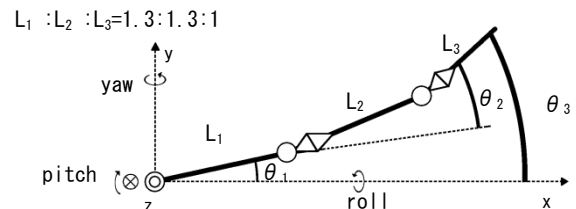


図 4 腕モデルの定義
Figure 4 Definition of arm model.

θ_1 , θ_3 は手の甲と肘に装着した「Colibri」から求めることができる。 θ_1 は肩関節の角度である。 θ_2 は肘関節と手首の角度を合わせた角度である。 θ_3 は θ_1 , θ_2 を合わせた角度である。

まず、 θ_1 の角度を肩関節の角度とする。次に θ_2 から肘

関節、手首の角度を決定する。肘関節と手首のうち roll 方向に回転するのは肘関節だけ、pitch 方向に回転するのは手首だけであるので θ_2 の roll, pitch 成分を肘関節の roll, 手首の pitch に割り当てる。残った θ_2 の yaw 成分は肘関節と手首の yaw 方向の角度に分割してそれぞれの関節の yaw に割り当てる。本研究で定義した水掻き動作では手首は yaw 方向にほとんど回転しないため、分割の割合は肘関節が 8 割、手首が 2 割とした。

4.1.2 モーションキャプチャ

本研究では実際の海女の水掻き動作（以下、教師動作と略す）を仮想空間に適用するためにモーションキャプチャを用いて各関節の角度を求める。モーションキャプチャは、小袖北限の海女の会会長の大下成子氏が室内で行った水掻き動作を 2 台のカメラで撮映した映像と、エル・エービー社の「PV STUDIO 3D ver.2.29」を用いて行った。

モーションキャプチャにより求めた各関節の角度を用いることで、教師動作を仮想空間へ適用することが可能となった。また、モーションデータを変更することで教師動作の変更も可能となった。そのため、様々な動きの海女モデル表示が可能である。

4.2 海女モデル適用

海女モデルに腕動作を適用する方法として、海女モデルにボーンを追加し、その関節の角度を毎フレーム更新する方法を採用した。毎フレーム、各頂点に各ボーンの付け根を中心とした回転行列をかけていくことで、任意の角度だけ海女モデルを動かす。この方法により、ボーンに各関節の角度を設定することで水掻き動作の可視化を実現した。

4.1.1 で算出された角度とモーションデータを海女モデルに適用する。モーションデータは関節の角度の情報が列挙されているため、4.1.1 で算出された関節の角度と同様に扱うことができる。海女モデルへの腕動作の適用例を図 5 に示す。



図 5 海女モデルの腕動作の適用例

Figure 5 Example of applying arm motion.

5. 腕動作の判定

5.1 判定法の提案

海女仮想体験学習システムの「(4) 実際に体を動かしての泳ぎの練習」では学習者が水掻き動作をできるようになったか判定するため、「(5) 仮想空間内での海女の漁の体験」では腕を動かすことで海中を泳ぐため、腕の動作を仮想空間に適用するだけではなく、腕動作が水掻き動作をしているか判定する必要がある。そのため、水掻き動作を判定する方法を提案する。

水掻き動作は手掌を体の前で交差させた状態と腕を横に広げた状態を繰り返している。本研究では、図 6 のように手掌を交差させた状態から腕を横に広げた状態へ遷移した時に水を掻いて移動する力が発生すると考え、手掌を交差させた状態から腕を横に広げた状態へ遷移した時を判定する。

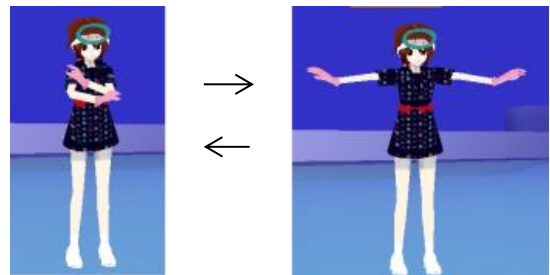


図 6 水掻き動作の状態遷移

Figure 6 State transition of paddle action.

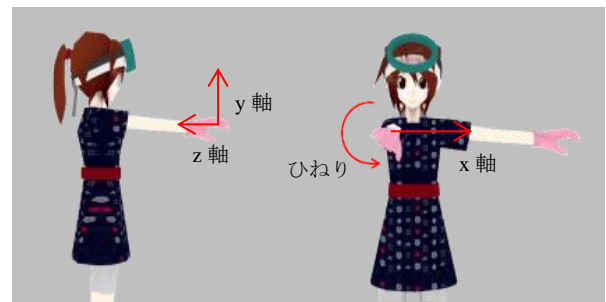


図 7 海女モデルの初期位置と軸の定義

Figure 7 First position and definition each axis.

水掻き動作の判定は、「Colibri」のデータを海女モデルに適用して求めた手掌の位置座標とひねりのデータを用いる。各データと海女モデルとの対応を図 7 に示すように定義する。水掻き動作を検出する前にキャリブレーションのために学習者も手掌を初期位置に合わせた後、センサの値を 0 にする。各データは 1 秒間に 30 点取得する。一回の水掻き動作は 1 秒程度であるが、学習者によって水掻き動作の速度が異なると考え、1 秒分を加えて 60 点記録し、判定に用いる。

水掻き動作の検出では、手掌の位置とひねりの二つを用いる。検出の閾値はモーションキャプチャした北限の海女

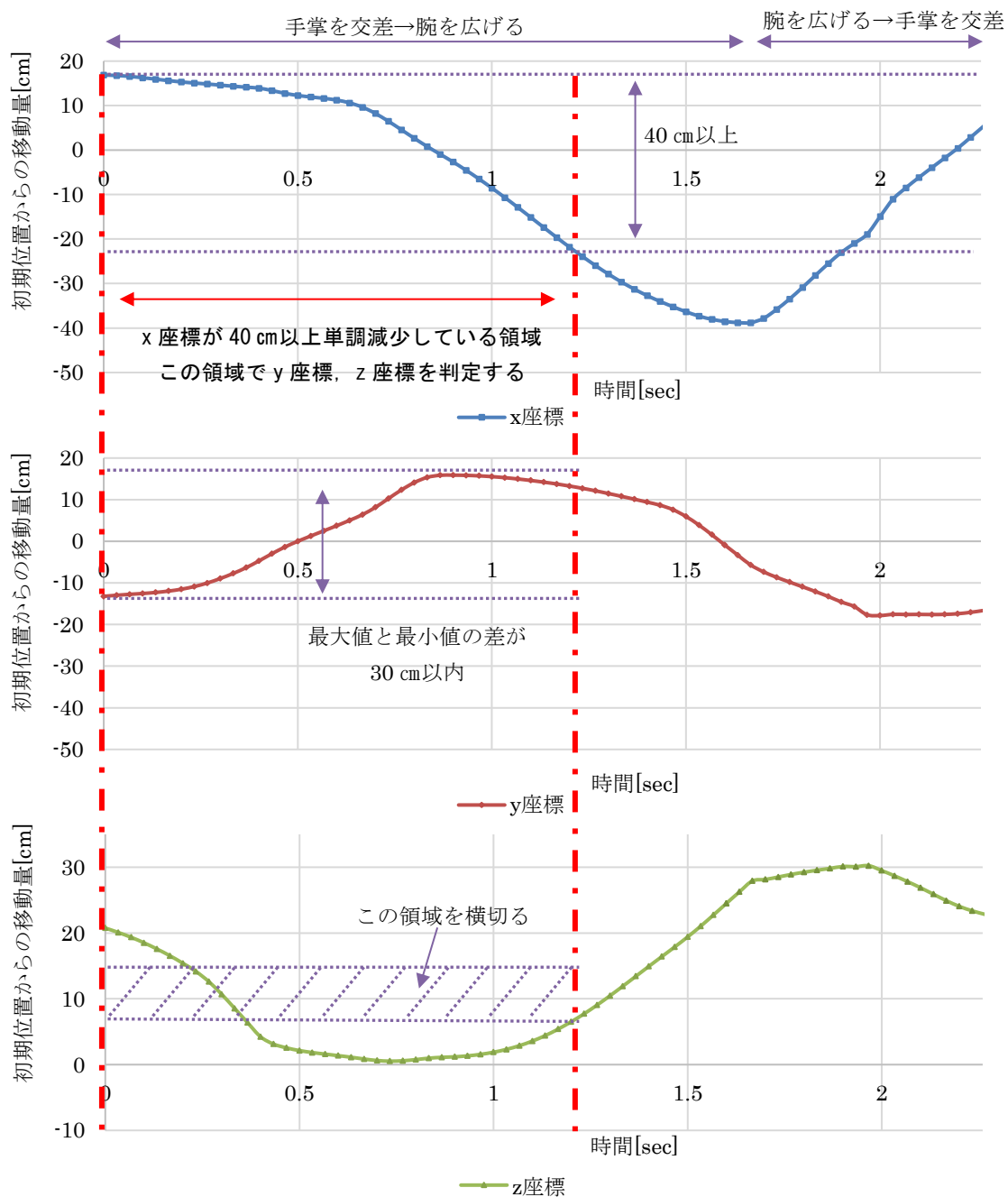


図 8 海女による水掻き動作を行なった際の手掌の位置データ
 Figure 8 Hand position data when woman diver plays the paddle action.

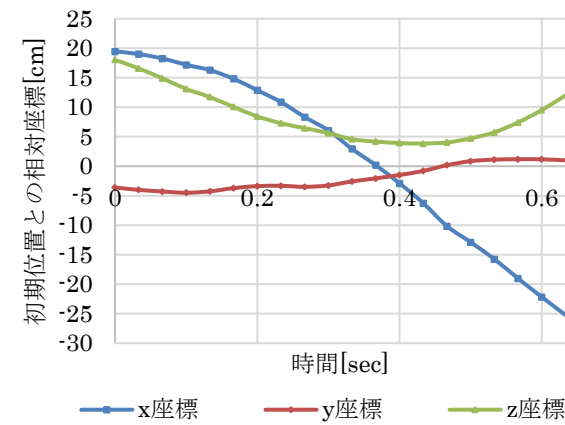
の動きを、身長 160cm の海女モデルに適用した後の手首の位置座標のデータを基にして決める。図 8 に腕を交差した状態から腕を広げ、再び腕を交差するまでの水掻き動作の手首の初期位置からの相対位置座標のデータを示す。

手掌を交差した状態から腕を横に広げた状態へ遷移する時に最も大きく変化しているのは x 座標である。そのため、はじめに x 座標の変化についての判定を行う。その後、変化量の小さい y 座標、z 座標についての判定を行う。

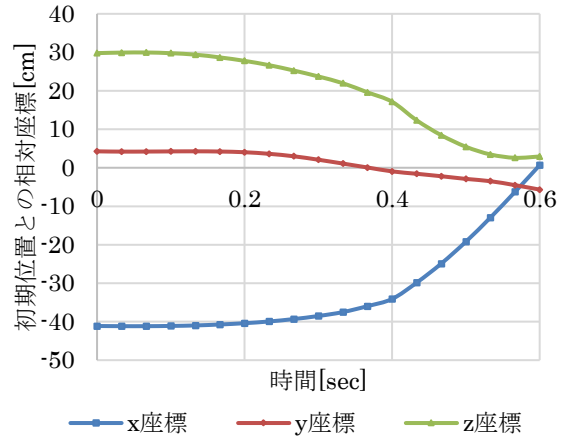
x 座標の手掌の相対座標は手掌を交差した状態から腕を横に広げた状態へ遷移する時は単調減少しているため、x

座標が大きく単調減少しているかを判別する。取得した最大 60 点の x 座標のデータのうち、参照中のデータを x_n と前回参照したデータを x_{n-1} とすると、 $x_n < x_{n-1}$ を満たす時、単調減少していると判断する。単調減少している範囲内の最大値と最小値の差が 40cm 以上のとき x 座標では水掻き動作をしていると判定する (図 8 x 座標)。

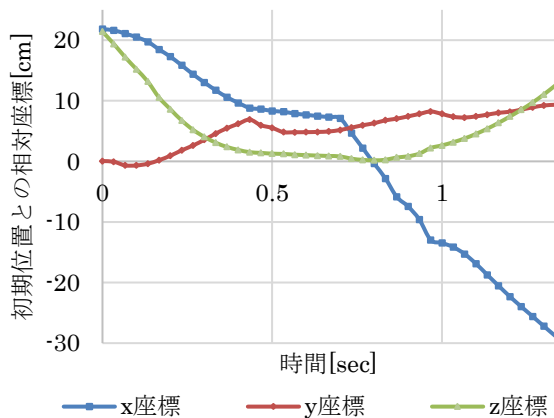
次に y 座標と z 座標について判定する。y 座標、z 座標のデータは x 座標が大きく単調減少している時の y 座標、z 座標を用いる。水掻き動作は手掌を地面に対して垂直に伸ばした状態で水を後方に押し出すように腕を回す動きとし



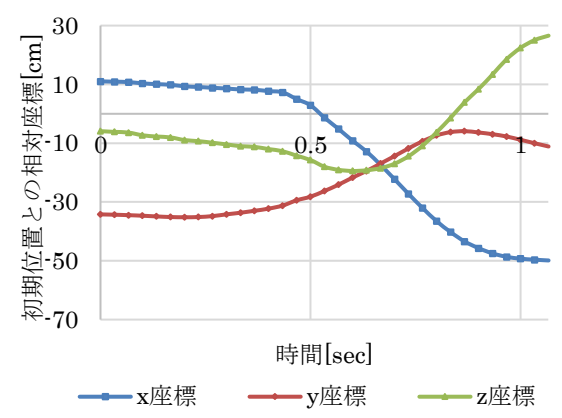
(A) 素早い水掻き動作



(C) 腕を広げた状態から手掌を交差させる動作



(B) 遅い水掻き動作



(D) 腕を交差した状態から斜め上に向けて広げる動作

図 9 4つの動作の位置データ

Figure 9 Position data of the 4 action.

ているため、y座標の変化は少ない。そのため、y座標の最大値と最小値の差が閾値より小さいかを判定する。y座標の閾値は海女の水掻き動作を参考にして、30cmとした(図8 y座標)。

手掌を伸ばした状態から後方に動かす動作判定のため、z座標については、手掌を前に伸ばしたかと後方に動かしたかを判定する。海女の水掻き動作を参考にしてz座標の最小値が8cm以下のとき手掌を前に伸ばしたと判定し、最大値が15cm以上のとき手掌を後方に動かしたと判定する。判定する範囲内でz座標の最小値が8cm以下かつ、最大値が15cm以上のときz座標では水掻き動作をしていると判定する(図8 z座標)。

手掌の相対座標で水掻き動作だと判定された後は、手掌のひねりについて判定を行う。水掻き動作では水を後方に押し出すように動かすため、手掌が地面に垂直な時から -90° 程度ひねる必要がある。そのため、手掌の相対座標で水掻き動作だと判定された範囲で手掌のひねりの平均値が閾値内にあるかを判定する。閾値は $-90^\circ \sim 0^\circ$ とした。

手掌の位置についての判定と手掌のひねりについての判定の両方で閾値内にある時、水掻き動作を行なったと判

定する。

5.2 判定法の評価

試作したシステムを用いて筆者自身が水掻き動作の判定を行った。その際(A)~(D)の4種類の動作を行った。

(A)は素早く水掻き動作する例、(B)は遅く水掻き動作する例、(C)は腕を広げた状態から手掌を交差させる動作する例、(D)は腕を交差した状態から斜め上に向けて広げる動作する例である。(A)、(B)は腕の速度が異なる水掻き動作でも判定できるかを調べる、(C)は判定される水掻き動作の逆順の動作をした時に水掻き動作と判定するかを調べ、(D)は水掻き動作と似た動作をした時に水掻き動作と誤判定するか評価するために行なった。図9に(A)~(D)の動作を行なった時の腕の位置データを示す。

判定の結果、(A)、(B)は水掻き動作と判定され、(C)、(D)は判定されなかった。速度が異なっても判定でき、逆順の動作や似た動作では誤認識されていないため、水掻き動作の判定が可能であると考えられる。

北限の海女の手掌の動きと各動作で相関係数を求めると表1のようになった。相関係数は北限の海女の水掻き動

作の時間軸を各動作の時間軸に合わせて求めた。

(A), (B) の相関係数はどれも高い値を示している。対して, (C) ではどの値も低い値を示しており, (D) では x 座標, z 座標の相関係数は高い値を示しているが y 座標の相関係数は低い。水掻き動作が検出された時と検出されなかった時で相関係数も異なっていることがわかる。

表 1 各動作に対する相関係数
Table 1 Correlation coefficient of each action.

動作	サンプル数	x 座標	y 座標	z 座標
(A)	20	0.986	0.763	0.711
(B)	41	0.993	0.574	0.895
(C)	33	-0.930	-0.544	-0.329
(D)	33	0.997	0.136	0.782

また, 検出されていてもその動作にかかった時間は (A) は (B) の半分程度であることがわかる。そのため, 動作にかかった時間も評価する必要がある。海女の手掌の動きでは, 手掌を交差した状態から腕を横に広げた状態になるまで 1.5 秒程度かかっている。そのため, 時間の評価では水掻き動作にかかった時間が 1.5 秒になるほど高評価になるように重み付けした。重み付けは水掻き動作にかかった時間が 1.5 秒の時に評価値が 1 に, 1.5 秒から離れるほど評価値が 0 に近づくように定めた。評価値が 0.5 以上の時, 水掻き動作であると判定を行う。

6. 評価と考察

6.1 海女による評価と考察

本研究で試作したシステムの評価のため, 平成 28 年 3 月 8 日に岩手県久慈市小袖海女センターにて小袖北限の海女の会会長大下成子氏に体験を依頼し, 意見やコメントを得た。その結果, 以下のことが分かった。

- (1) 教師動作の可視化はできている
- (2) 教師動作が実際に潜るときの水掻き動作よりも遅い
- (3) 大下氏の水掻き動作の判定ができなかった
- (4) 海底の状態は 2011 年の東日本大震災前後で大きく変わっている。2011 年の東日本大震災後は岩や海藻が流されて, 岩や海産物が少なくなり, 砂地が多く露出している。

それぞれに対する考察を以下に述べる。

(1) に関して

教師動作の可視化はできていることが分かったので, 現在のモーションキャプチャを用いている方法を今後も継続する。

(2) に関して

教師動作の速度が実際に潜るときの水掻き動作よりも遅かったのは, 水掻き動作を撮影する際, 説明をするため

に遅くなったと考えられる。これは, 教師動作を再生する際, 再生する速度を速めれば改善することが可能である。

(3) に関して

大下氏の水掻き動作が判定されなかったのは, 主に x 座標の閾値が大きかったのが原因であると考えられる。教師動作では水掻き動作が遅かったため, 手を横に大きく掻いていたが, 実際に潜るときのように素早く何度も掻くと腕を広げるための時間が短くなるため, 手掌の x 座標の移動量が少なくなると考えられる。そのため, 今後は水掻き動作の判定を正しく行えるように判定の閾値を調整していく必要がある。

(4) に関して

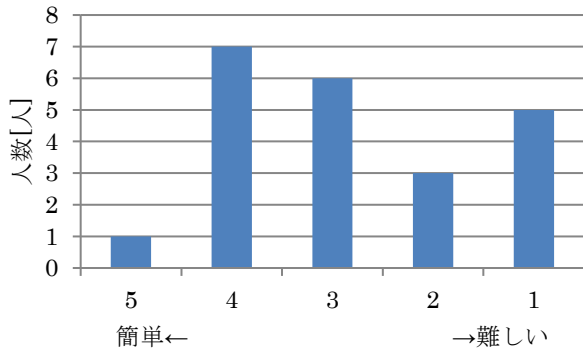
海底の状態は現在の小袖海岸の現状を知ってもらうために重要な要素の一つだと考えられる。そのため, 2011 年の東日本大震災前に撮影した海底の映像と東日本大震災後に撮影した映像を比較し, 岩や海産物の数を減らして海底に配置する必要がある。

6.2 小中学生による評価と考察

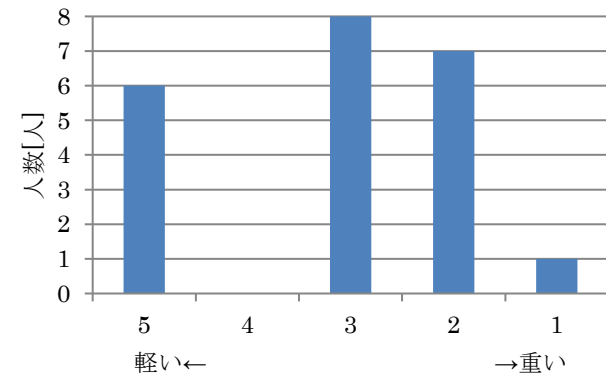
本研究で試作したシステムの評価のため, 平成 28 年 5 月 29 日に青森県東北町の青森原燃テクノロジーセンターで行われたサイエンスフェスティバル 2016 で体験学習会を行った。システム体験後にアンケート調査を行い, 5 段階で評価を行なった。被験者は 22 人で主に小中学生である。質問項目は全部で 8 項目あるが, その中で, 4 つに注目する。研究の目的にある, センサの数を減らし, 装着を容易にできているか評価するため「身に付けるのは簡単ですか」と「装置の重さはどうですか」という 2 つの質問と, 腕動作を海女モデルに適用し可視化したことで学習が容易になったか評価するため「先生はわかりやすかったですか」という質問, 提案した水かき動作の判定法の評価のため「上手に潜れましたか」という質問の結果を図 10 に示す。

装着の容易さについての項目の平均値は 2.82 で装着が難しいと感じる割合が多かった。装着物の重さについての項目の平均値は 3.14 で装着物が軽いつ感じている割合が多かった。このことから, 装着物の重さはセンサが 2 つでも学習には問題ない重さであることが分かったが, 装着方法が複雑であると考えられる。装着が複雑である理由は, コンピュータには 2 つのセンサ, データグローブ, HMD の画像の出力や電源のケーブルが接続されているため, そのコードが絡まないように装着する必要があるためだと考えられる。また, 被験者の体の近くにケーブルがあるため, 踏く危険性もある。そのため, ケーブルを削減し, 装着を容易にし, 安全に体験できるようにする必要がある。

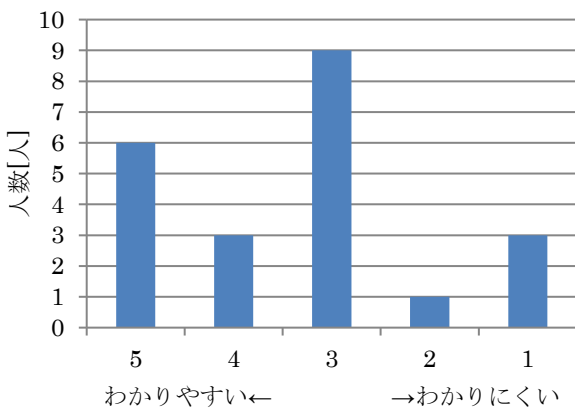
「先生はわかりやすかったですか」という質問の平均値は 3.36 で多くの人がわかりやすいと答えている。このことから, 教師動作を可視化することで水掻き動作の学習が容易になっていると考えられる。



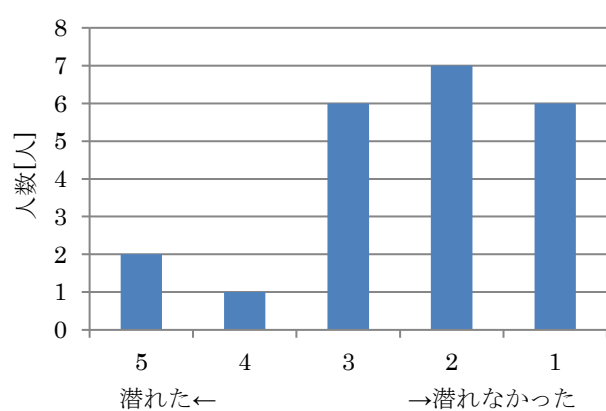
身に付けるのは簡単?



装置の重さはどうですか



先生はわかりやすかったですか



上手にもぐれましたか

図 10 サイエンスフェスティバル 2016 アンケート結果
Figure 10 Result of questionnaire in Science Festival 2016.

「上手にもぐれましたか?」という質問の平均値は 2.43 で多くの方が上手に潜れていなかったと答えている。このことから体験者が思っているように水掻き動作の判定がされなかったと考えられる。判定法では腕を交差させた状態から腕を横に広げた状態に移るときを判定しているが、本システムでは、立位で下に向かって泳ぐ動作をするので、手が下向きになり、判定の閾値から外れるためだと考えられる。多くの方が上手に潜れていないと直感的操作ができているとは言えないため、腕動作の判定法の改善が必要である。

7. 判定法の改善

7.1 改善法の提案

6.2 のアンケート評価で腕を水平に動かしたときの判定だけでなく、腕を下向きに動かしたときに判定できるようにする必要があることが分かった。改善法として HMD に装着できるジャイロセンサから得られる頭の角度を用いる方法を提案する。現在判定している水掻き動作は腕が水平である必要がある。そのため、ジャイロセンサからわかる頭の角度を学習者の肩関節の角度から引いた値を海女モデルに割り当てる。これにより、頭の角度と肩の角度が等しい時、腕が水平となり (図 11(a)), 5.1 の判定法で水掻き動作を判定できるため、腕を下向きに動かしたときも判定することが可能である。

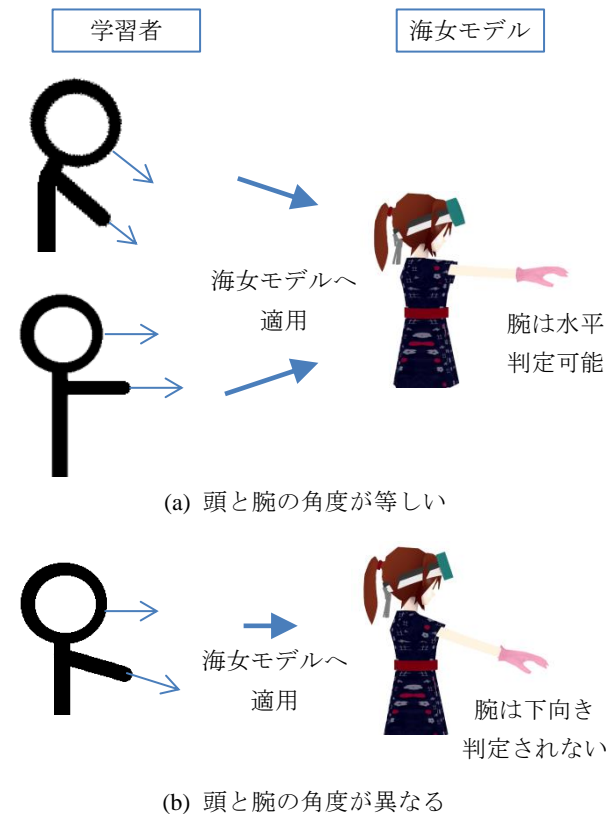


図 11 頭と腕の角度による海女モデルの腕の角度の変化
Figure 11 Variation of arm angle for head and arm angle.

7.2 改善法の評価

改善した腕動作の判定法の評価のために平成 28 年 8 月 7 日に岩手県久慈市小袖海岸で行われた海女フェスティバルで体験学習会を行った。システム体験後にアンケートを行い、5 段階で評価を行なった。被験者は 7 人で全て小学生である。質問内容はサイエンスフェスティバルと同様とした。その中で上手にもぐれましたかという質問項目の結果を図 12 に示す。

アンケートの結果は平均値が 3 であり、サイエンスフェスティバルより、上手く潜れている割合が多くなっている。また、ウニの取得個数の平均はサイエンスフェスティバルでは 1.35 個であったのに対して海女フェスティバルでは 9.43 個に大幅に向上した。このことから、腕動作の判定法を下向きに水かき動作を行っても判定できるように改善したことで、直感的操作を可能とした。

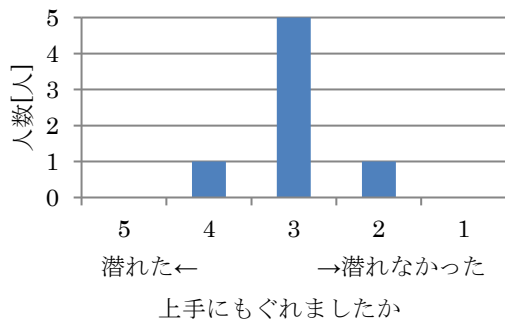


図 12 海女フェスティバルのアンケート結果

Figure 12 Result of questionnaire in Ama Festival.

8. まとめ

本研究ではウェアラブルセンサやモーションキャプチャを用いて腕の角度を測定し、腕動作を仮想空間内に適用し、水掻き動作の可視化を行なった。アンケート調査から、水掻き動作の可視化により学習が容易になった事がわかった。また、水掻き動作の判定法を提案し、直感的操作を可能とした。

今後の課題は 2011 年の東日本大震災による海底の状態変化の再現や装着物の装着を容易にするためにケーブルをまとめることが挙げられる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、青森原燃サイエンスフェスティバル関係者の皆様、久慈市漁業協同組合小袖漁業生産部の皆様、モーションキャプチャのための動画撮影やシステム評価にご協力いただいた小袖北限の海女の会会長大下成子氏、実地調査やアンケート調査にご協力いただいた皆様に謹んで感謝の意を表します。

参考文献

1) 鶴田清也, 崔雄, 八村広三郎: 没入型仮想環境における 3DCG

キャラクタアニメーションの表示手法, 情報処理学会研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC) 2006 (24(2006-EC-003)), pp.91-96, 2006-03-14.
2) 宮里洸司, 大城聖也, 野口健太郎, 神里志穂子: 慣性センサによるバイオリンの運弓動作指導の検討, 情報科学技術フォーラム講演論文集 10(3), pp.783-784, 2011-09-07.
3) 野澤拓人, 細川靖, 土井章男, 高田豊雄, 阿部芳彦: 海女仮想体験学習システム「海女 via-W」の水掻き動作検出, 平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, ヒューマンインタフェース・ロボット, 1F01(CD-ROM), 2012.8.