

Swimoid: 伴泳ロボットを用いた水泳支援システム

鵜飼 佑 暦本 純一*

概要. 水中で人と一緒に泳ぎ、支援する伴泳ロボットがいたら、どんな事ができるだろうか？伴泳ロボットとは、人間と一緒に泳ぐ事で様々な支援を行う水中パートナーロボットである。近年、様々な形での水泳支援技術に関する研究や、AUV(Autonomous Underwater Vehicle:自律型無人潜水機)に代表される水中ロボットを用いた研究が行われているが、これらの水中ロボットを用いた水泳支援に関する研究は未だ行われていない。そこで本論文では、伴泳ロボットを用いた水泳支援システム「Swimoid」を提案する。Swimoidは、スイマーの真下を泳ぐ伴泳ロボットと、伴泳ロボットを用いたアプリケーション群から構成される。本論文では、Swimoidのアプリケーションとして、泳いでいる自分が見える「セルフアウェアネス支援アプリケーション」、プールサイドのコーチとスイマーのコミュニケーションを伴泳ロボットを用いて行う「ドローイングアプリケーション」、伴泳ロボットを用いてゲームを行う「ゲームアプリケーション」の3種類のアプリケーションを提案し、実装を行った。その結果、パートナーロボット型の水泳支援システムの利点と欠点が明らかになった。本論文では、真下を泳ぐ伴泳ロボットを用いた水泳支援システムの提案を行ったが、今後様々な形のパートナーロボット型水泳支援システムが登場する事が予見され、教育や指導といった分野に限らず安全監視やエンターテインメントといった様々な分野で新しいアプリケーションが登場する事が期待される。

1 はじめに

我々の住む地球という星の、約70%は海である。また、日本国内だけでも4万箇所ものプールが存在する。この事からもわかるように、我々の身の回りは水であふれている。水中で人と一緒に泳ぎ、支援するパートナーロボットがいたら、どんな事ができるだろうか？本論文では、このような水中パートナーロボットを「伴泳ロボット」と呼ぶ。

伴泳ロボットを用いたアプリケーションとしては、例えばプールで水泳競技を行うスイマーの技術向上の支援や、安全監視を行うものが考えられる。また、水泳は競技としてのみならず、レクリエーションやリハビリテーションとしても楽しまれている。そこで例えば、陸上の散歩における犬のように、イルカのようなロボットがこれらの人々のモチベーション向上に寄与するようなアプリケーションも考えられる。他にも、海水浴場の安全監視や、ダイビングを行うダイバーの支援を行うアプリケーションも考えられるだろう。また、動きや音、光を用いて水中でゲームを行うような、エンターテインメントアプリケーションも考えられる。これらアプリケーションの目的によって、伴泳ロボットの形状や、水中の人間との位置関係には様々なパターンがありえるだろう。

従来の水泳支援システムに関する研究では、プールに取り付けたカメラやモーションキャプチャに代表されるインフラ型のシステムや、スイマーに何らか

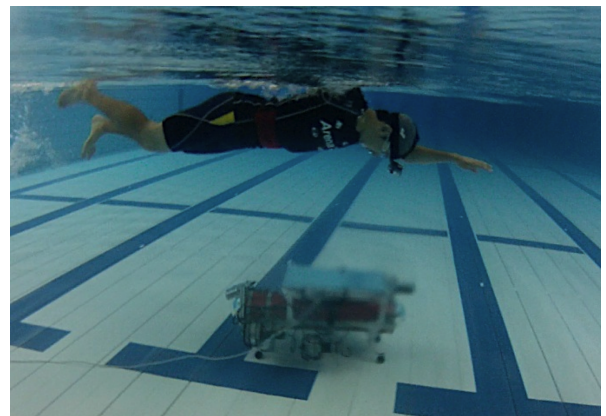


図 1. Swimoid の稼働風景

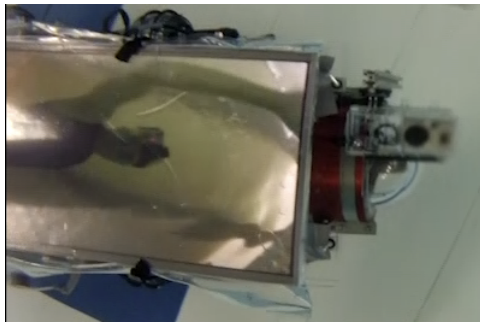
のデバイスを取り付けるウェアラブル型の研究が盛んに行われており、伴泳ロボットの様なパートナーロボット型の水泳支援技術は従来存在していなかった。

2 Swimoid:伴泳ロボットを用いた水泳支援システム

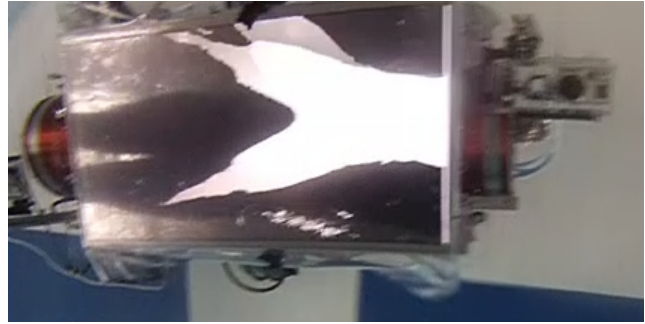
そこで本論文では、パートナーロボット型の水泳支援の一例として、スイマーと共に泳ぎスイマーの支援を行う「伴泳ロボット」を提案し、伴泳ロボットを用いて水泳支援を行うシステム「Swimoid」を実装した。Swimoidは、伴泳ロボットと伴泳ロボットを利用したアプリケーション群から構成されており、カメラやディスプレイを搭載した伴泳ロボットがスイマーの真下を伴泳する事で、様々な形でスイマー

Copyright is held by the author(s).

* Yu Ukai, 東京大学大学院 学際情報学府 Jun Rekimoto, 東京大学大学院 学際情報学府, ソニーコンピュータサイエンス研究所



(a) 通常表示



(b) 二値化

図 2. セルフアウェアネス支援アプリケーション

の支援を行う。Swimoid が実際に稼働している様子を、図 1 に示す。

3 Swimoid のアプリケーション

Swimoid には、伴泳ロボットを用いた複数のアプリケーションが実装されている。本章では、実装したアプリケーションの説明と今後の可能性について述べる。

3.1 セルフアウェアネス支援アプリケーション

目的 : スイマーのセルフアウェアネス支援

セルフアウェアネス支援アプリケーションは、「泳いでいる自分が見える」アプリケーションである。

水泳に限らず、多くのスポーツにおいて、自らのフォームに関する心的イメージを得る事は、能力を向上させたり、スポーツに対するモチベーションを維持したりする上で、重要であると言われている [6]。一般的にはコーチ等の他者がプレイヤーのフォームを外部から観察し、フィードバックを行うという方法が取られる事が多い。

水泳においても、コーチがスイマーのフォームを確認し、フィードバックを行う指導が一般的に行われている。しかし、プロのアスリートや部活動を行っている学生以外の一般のスイマーは、コーチから指導を受ける事が難しい。

そこで本論文では、伴泳ロボットを用いたセルフアウェアネス支援アプリケーションを提案する。このアプリケーションは、カメラの映像をディスプレイに表示する事で、水中でリアルタイムに自らのフォームの確認を行う事ができるものである。伴泳ロボットは、前方と後方にそれぞれカメラを 1 台ずつ搭載している為、泳法やチェックしたい部位にあわせて、カメラの映像を切り替える事が可能である。クロールであればプル（手のかき）が大事であると言われており、平泳ぎであればキック（足の蹴り）が大事であると言われている為、泳法によってチェックする部位を切り替える事が出来る事は重要である。スイマーの頭部にカメラを装着して撮影した利用風景の画像を図 2(a) に示す。また、映像の二値化を行う事



図 3. ドローイングアプリケーションを用いて、プールサイドのコーチがクロールのプルに関する指導を行っている様子

でフォームの認識を容易にする機能も実装した。利用風景の画像を図 2(b) に示す。

また、リアルタイムに確認するだけでなく、撮影した映像をプールサイドで防水機能付きのタブレット型端末を利用して見返す、といった使い方も考えられる。

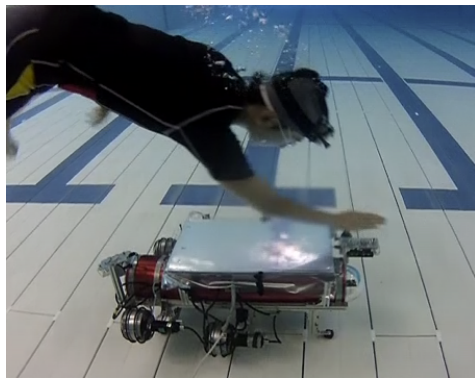
3.2 ドローイングアプリケーション

目的 : プールサイドにいるコーチとスイマー間のコミュニケーション支援

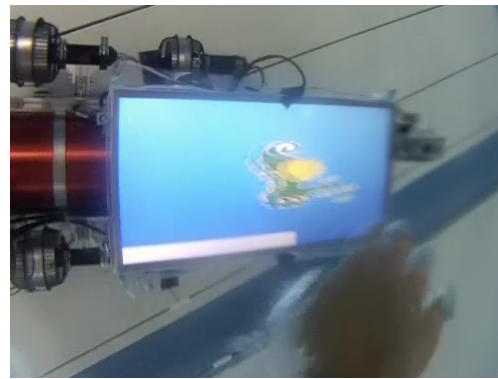
ドローイングアプリケーションは、プールサイドにいるコーチとスイマー間のコミュニケーションを、伴泳ロボットを用いて行うものである。

通常、プールサイドにいるコーチからスイマーへの情報伝達は、声を用いて行われているが、水中ではプールサイドからの音声を正しく認識する事は難しい。そこで [2] では、コーチからスイマーへの情報伝達をゴーグルに埋め込んだ LED や、振動モータを用いて行う事を提案しているが、点滅や振動パターンの変化のみでは伝達可能な情報量が限られてしまうという問題があった。

そこで Swimoid では、伴泳ロボットを用いてプールサイドからコーチと水中のスイマーに情報伝達を行うドローイングアプリケーションを実装した。こ



(a) 利用風景



(b) スイマー視点

図 4. ゲームアプリケーション

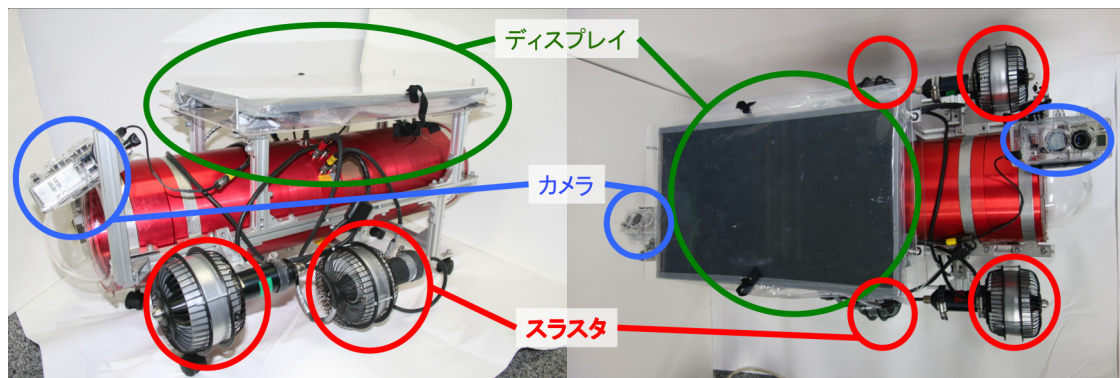


図 5. 伴泳ロボットの全体像と機器構成

のアプリケーションは、プールサイドにいるコーチが画面上で線や図を描く事で、伴泳ロボットに取り付けられたディスプレイ上にコーチが描いた物が表示されるというものである。実際に利用している模様を図3に示す。このシーンでは、陸上にいるコーチが動画でスイマーの泳ぎを見ており、手をまっすぐかくように、との指導を行なっている。クロールにおいては、手をまっすぐかく事が重要であるが、コーチが手を持って指導してしまうと、フォームの修正をうまく行う事は難しい。このように、伴泳ロボットを介してコーチがスイマーに指導を行う事で、これらの問題を解決する事が可能となる。

3.3 ゲームアプリケーション

目的: インタラクティブなゲームを用いて、子どもを水に慣れさせる

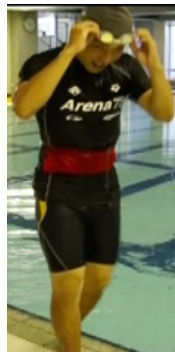
これまでに記載したアプリケーションは、主に水泳のフォームを指導する為のものだったが、伴泳ロボットはこれらの目的以外にも利用可能であると考えられる。例えば水に慣れる為に行われるゲームにプールの底に沈む輪っかを拾う、というものがある。

Swimoidでは、伴泳ロボットを用いる事で、この水に慣れるゲームをよりインタラクティブにしたゲームアプリケーションを実装した。実際に利用してい

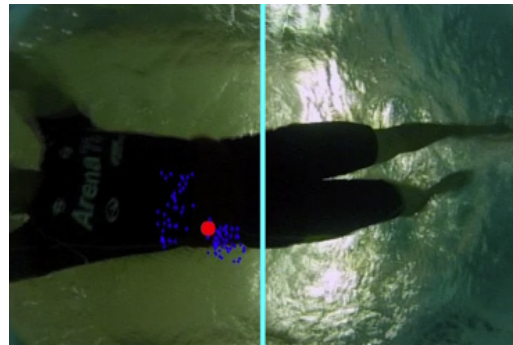
る風景を図4(a)に示す。このアプリケーションでは、輪っかを拾うという行為の代わりに、カメラにタッチする事で画面の中のキャラクターを捕まえる事が出来る。キャラクターは画面上をランダムな周期で一定方向に進み、画面内にキャラクターが表示されている時間内にスイマーはカメラをタッチしなければならない。スイマー視点の画像を図4(b)に示す。

3.4 機器構成と実装

Swimoidで利用した伴泳ロボットを、図5に示す。本ロボットの大きさは、奥行き96cm、幅58cm、高さ42cmである。伴泳ロボットは、東京大学生産技術研究所海中工学国際研究センター浦研究室が開発した小型AUVをベースとして開発されており、水深10m耐圧となっている。圧力容器は円筒型となっており、容器内部にはノートパソコンの他バッテリーや各種電気回路などの機器を収納している。推進器にはマグネットカップリング方式の防水スラスタを利用し、4機全てを水平スラスタとして使用する。また、スラスタの電源として12.0V、7000mAhの充電式ニッケル水素電池パックを2セット搭載して用いている。圧力容器の前後にはカメラがそれぞれ1機ずつ搭載されており、上部には22インチのディスプレイが搭載されている。



(a) スイマー認識
に利用した赤い
マーカ



(b) 実際にパーティクルフィルタを用いてトラッキ
ングを行っている様子

図 6. スイマー認識

3.5 動作原理

伴泳ロボットは、圧力容器の前後にそれぞれ1機ずつ搭載されたカメラから取得した映像を用いてスイマーの認識を行い、適切な位置に制御される。伴泳ロボットでは、4機の水平スラストを用いて、水平方向の制御を行っている。伴泳ロボットのベースとして用いたAUVは、2機の水平スラストと2機の上下スラストで制御を行っており、伴泳ロボットにおいても上下方向の制御を行う事は可能だが、プールという限られた環境下で実験を行う事を想定し、車輪を付ける事で4機全てのスラストを水平方向の制御及び推進力として用いている。また、スイマーは競泳用プールに取り付けられたコースロープに沿って泳ぐ事が一般的であり、伴泳ロボットもヨー方向の制御を行い、直進を行う必要がある。伴泳ロボットでは、圧力容器内部に搭載された電子コンパスを利用しヨー方向の制御を行なっている。

3.6 スイマーの認識

伴泳ロボットが伴泳を行う為には、スイマーの認識を行い、水平方向の制御を行う必要がある。本研究では、スイマーの体に図6(a)のような特定色のマーカを取り付け、色抽出とパーティクルフィルタを用いてスイマーの認識を行った。スイマー認識の模様を図6(b)に示す。

4 議論

本論文では、パートナーロボット型水泳支援システムの一例として、伴泳ロボットを用いた水泳支援システム「Swimoid」の提案と実装を行った。

しかし従来から、プールに取り付けたカメラやモーションキャプチャに代表されるインフラ型のシステムや、スイマーに何らかのデバイスを取り付けるウェアラブル型の水泳支援システムに関する研究は盛んに行われてきた。

本章では、既存の水泳支援システムの整理を行っ

た上で、本論文で提案している伴泳ロボットを用いたパートナーロボット型の水泳支援システムとの比較及び議論を行う。

4.1 関連研究

水泳競技において、タイムを向上させる為にはフォームが大変重要である。また、水泳理論は各年代ごとに移り変わっており、各泳法において年代ごとにフォームが大きく変わっている。例えば、「前畑がんばれ」で有名な前畑秀子は1936年に行われたベルリンオリンピック女子200m平泳ぎで金メダルを獲得したが、当時の前畑のフォームと現在主流となっているフォームは全く異なる理論に基づいている。前畑のベルリンオリンピックの記録(3分3秒6)は2011年の女子学童記録(2分34秒68)にも到底及んでおらず、水泳においていかにフォームが重要であるかを示している。

このような背景もあり従来から、プールの底に設置されたカメラを用いてスイマーの泳ぎを解析し、支援を行う取り組みが行われてきた[7]。近年は、水中のモーションキャプチャシステム[1]も登場しており、オリンピック選手などの泳法改善に役立てられている。しかし、上記の様なシステムは、プールに大掛かりなインフラ整備を行う必要があり、限られたスイマー以外は利用する事が難しかった。

そこで近年、スイマーにウェアラブルセンサを装着させ、それらから取得した情報によってスイマーの運動技能を評価するシステムの製品開発や研究が行われるようになってきた。現在主流となっているのは、スイマーが装着した加速度計を用いて泳ぎのセンシングを行うもの[2, 9]であり、これらの技術を用いた製品も発売されている。ウェアラブルセンサによる計測は、プールに大規模なシステムを導入する必要がない為、アマチュアスイマーにも普及しやすいと考えられている。

以上の様に、現在行われている水泳支援に関する研究や、関連製品はプールにカメラやモーションキャ

ブチャといったシステムを取り付けるインフラ型と、ウェアラブルセンサをスイマーに装着したウェアラブル型の2つに大きく分類できる。

この様に、スイマーの支援を目的とした水泳支援技術の研究開発は、既に数多く行われてきた。

一方で、近年 AUV[3] に代表される水中ロボットの研究や開発も盛んに行われている。AUV を用いたアプリケーションとしては、環境保全や船や橋梁等の建造物の点検といった形で水中の調査を行うものが一般的であり、様々な研究 [8, 5] が活発に行われている。

この様に、AUV 及び AUV を用いたアプリケーションに関する研究や、水泳支援を行うシステムの研究が盛んに行われる一方、AUV がパートナーとして水中にいる人間の支援を行うパートナーロボット型の水泳支援システムに関する研究は行われていない。そこで本論文では、小型 AUV を伴泳ロボットとして用いた、パートナーロボット型の水泳支援システムの提案を行った。

4.2 比較検討

インフラ型とウェアラブル型、今回提案したパートナーロボット型の水泳支援システムにはそれぞれ得手不得手があり、どのシステムが優れていると一概には言えない。パートナーロボット型の水泳支援システムが従来のシステムと比べて優れている点を整理すると、インフラ型のシステムに対してはプール自体に新たなシステムを取り付ける工事を行う必要がない為、導入障壁がコスト面からも低いという点で優れていると言える。また、ウェアラブル型のシステムはスイマーにデバイスを装着してもらう為、重量や形状を考慮する必要がある、利用可能なデバイスが限られてしまうが、パートナーロボット型ではそのような考慮を比較的行わなくても良い点が優れていると言える。また、プールや湖等の屋外環境においても稼動可能である事は、パートナーロボット型の利点であり、様々なアプリケーションの登場が期待される。

一方で、パートナーロボット型には様々な課題も存在する。まず、パートナーロボット型のシステムでは何らかのデバイスを用いて、支援対象の人間との相対的な位置関係を認識する必要がある。本論文で提案した Swimoid ではカメラ 2 台を利用し、スイマーに取り付けたマークを利用する事でスイマーの認識を行なっているが、カメラの画角の問題からスイマーを見失ってしまう事が多い。この課題は、より広角のカメラを利用するか、より多くのカメラを利用する事で解決可能であると考えているが、パートナーロボット型のシステムが抱える課題であると言える。

また、インフラ型、ウェアラブル型、パートナーロボット型という分類は暫定的なものであり、将来的

にはこれらの分類を横断した様々なシステムが登場する事が予想される。例えば、スイマーに取り付けたセンサの値を解析し、パートナーロボットを用いてフィードバックを行う、ウェアラブル型とパートナーロボット型を融合したシステムも考えられる。また、水中モーションキャプチャシステムで認識したスイマーの泳ぎをリアルタイムでパートナーロボットを用いて表示するような、インフラ型とパートナーロボット型が融合したシステムの登場も予見される。

しかし、水中では基本的に無線通信を行う事が出来ない為、インフラ型やウェアラブル型のシステムとの通信をどのように行うのか、という問題がある。Swimoid では、プールサイドの PC と伴泳ロボット間の通信は有線 LAN ケーブルを利用して行っている。これは、ドローイングアプリケーションのようなプールサイドの PC との通信を必要とするアプリケーションを実現する為であると同時に、緊急時に伴泳ロボットを停止させる為の安全対策でもある。しかし、有線 LAN ケーブルを利用すると稼動範囲が制限されてしまったり、ケーブルに伴泳ロボットやスイマーが絡まってしまうという問題が存在する。将来的には、水面に浮く浮きに無線 LAN ルータを設置し、伴泳ロボットと共に浮きが移動する事で解決可能であると考えている。

5 まとめと今後の課題

5.1 結論

本論文ではパートナーロボット型水泳支援システムの一例として、伴泳ロボットを用いて水泳支援を行うシステム「Swimoid」の提案を行った。伴泳ロボットは、カメラを利用してスイマーの認識を行い、スイマーに対して適切な位置に制御を行う事で、様々なアプリケーションによる水泳支援を実現する。また本論文では、伴泳ロボットの有用性を検証する為に複数のアプリケーションの実装を行った。セルフアウェアネス支援アプリケーションでは、「泳いでいる自分が見える」事を実現した。ドローイングアプリケーションでは、水中にいるスイマーとプールサイドにいるコーチとのコミュニケーションに、伴泳ロボットを利用する事で、フォームの修正に関する指導をリアルタイムに行う事が出来るようになった。ゲームアプリケーションでは、水に慣れる為のプール底の輪っかを拾うゲームを伴泳ロボットを用いて実現した。その結果、前章であげたパートナーロボット型の利点や欠点が明らかになった。

5.2 今後の展開

Swimoid で利用した伴泳ロボットは、スイマーの真下を伴泳する事で支援を行うものだった。しかし、伴泳ロボットには真下を泳ぐだけでなく、スイマーの後ろを追いかけたり、前を泳いで牽引したり、周囲

をふわふわ泳ぎ回ったりといった様々なパターンがあると考えている。水泳はスポーツであるとときに、全身の筋肉や心肺機能が鍛えられることから健康維持やリハビリテーションを目的とした運動でもある。その為、教育や指導に限らず、安全監視やエンターテインメントの分野で伴泳ロボットを用いた様々なアプリケーションが登場するのではないかと。

例えば伴泳ロボットを用いた水泳支援のその他の形としては、伴泳ロボットが過去の自分やプロスイマーの速度で伴泳してスイマーを引っ張る様なアプリケーションも考えられる。他にも、水中にいる子どもたちの間をふわふわと泳ぎ回るボール型の伴泳ロボットを用いた全く新しい水中ゲームや、同様のロボットを用いた安全監視システムが考えられる。

また、従来の HRI (Human Robot Interaction) 研究は、床を移動するヒューマノイドロボットやそれに近いロボットと人間の間のインタラクションに関する研究が主であった。一方、飛翔型ロボットや水中ロボットといった陸上以外の特殊な環境で稼働するロボットと、人間とのインタラクション研究はあまり行われていなかった。しかし、これらのロボットは、人間が通常行う事が難しいタスクを行う事が可能であり、人間とのインタラクションに関する研究を行う事には意義があると言える。例えば、水中における HRI に関する研究としては、スイマーが手に持った二次元バーコードを小型 AUV のカメラで認識する事で、スイマーと AUV がコミュニケーションを行う手法 [4] が提案されているが、伴泳ロボットを用いた様々なアプリケーションを実現する為には十分であるとは言えない。

Swimoid ではスイマーとのインタラクション手法が限られていたが、様々な形状で様々な支援を行う伴泳ロボットを実現する為には、水中での HRI についてより一層の研究を行う必要があり、Swimoid の開発で得た知見を活かして新しい分野を開拓したい。

謝辞

本研究は、IPA2011 年度未踏 IT 人材発掘・育成事業の支援のもと行われている。また、本研究の一部は、東京大学生産技術研究所海中工学国際研究センター・巻研究室に協力をいただいている。

未来ビジョン

Swimoid は、プールでの利用を想定したシステムであったが、将来的にはパートナーロボット型の利点を活かして海や湖で利用可能なシステムの実現が期待される。例えば、伴泳ロボットを用いたダイバー支援システムが考えられる。ダイバーは通常、2人以上でお互いが相手側の安全を確認しあうバティシステムによって、安全を保っている。しかしそれでも、年間 20 人 30 人ものダイバーが死亡するか、行方不

明になっている、という現実がある。伴泳ロボットがダイバーと伴泳し、緊急時には周囲のダイバーに危険を知らせたり、水上まで浮上して無線通信によってレスキューを呼ぶ事が出来れば、事故を減らす事ができるのではないかと。他にも、ダイビングスポットまで伴泳ロボットが先導を行ったり、ダイバーの周囲にいる生き物の種類をカメラを用いて判別するようなアプリケーションも考えられる。

近い将来、伴泳ロボットが世界中に普及し、教育や安全、エンターテインメントといった様々な形で水中にいる人間の支援を行うデバイスとなる可能性が十分にある。

参考文献

- [1] Qualisys Underwater Motion Capture <http://www.qualisys.com/>.
- [2] M. Bächlin, K. Förster, and G. Tröster. Swim-Master: a wearable assistant for swimmer. In *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing, Ubicomp '09*, pp. 215–224, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [3] D. Blidberg. The development of autonomous underwater vehicles (auvs); a brief summary. In *IEEE ICRA*, Vol. 6500, 2001.
- [4] G. Dudek, M. Jenkin, C. Prahacs, A. Hogue, J. Sattar, P. Giguere, A. German, H. Liu, S. Saunderson, A. Ripsman, S. Simhon, L.-A. Torres, E. Milios, P. Zhang, and I. Rekleitis. A visually guided swimming robot. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3604–3609, aug. 2005.
- [5] T. Maki, T. Ura, and T. Sakamaki. Map based path-planning and guidance scheme of an AUV for inspection of artificial structures. In *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, pp. 1–7, oct. 2009.
- [6] K. Martin, S. Moritz, and C. Hall. Imagery use in sport: A literature review and applied model. *The sport psychologist*, 1999.
- [7] H. Takagi, S. Sugimoto, N. Nishijima, and B. Wilson. Swimming. *Sports Biomechanics*, 3(1):15–27, 2004.
- [8] J. Vaganay, M. Elkins, D. Esposito, W. O'Halloran, F. Hover, and M. Kokko. Ship Hull Inspection with the HAUV: US Navy and NATO Demonstrations Results. In *OCEANS 2006*, pp. 1–6, sept. 2006.
- [9] O. Yuji, I. Hiroshi, and M. Chikara. Microcomputer-based Acceleration Sensor Device for Swimming Stroke Monitoring (Proceedings of the Switzerland-Japan Workshop on New Directions in Cellular and Tissue Biomechanics) (Special Issue on Bioengineering). *JSME international journal. Series C, Mechanical systems, machine elements and manufacturing*, 45(4):960–966, 2002-12-15.