

歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の開発

運輸省第五港湾建設局	正会員	市原正史
運輸省第二港湾建設局		前田 武
同 上		石原弘一
運輸省港湾技術研究所	正会員	岩崎峯夫
同 上		秋園純一
同 上		根本孝志
運輸省第一港湾建設局		朝倉 修

1. はじめに

港湾工事にともなう水中調査作業は潜水士の人力によって行われている。しかし、水中という悪条件のため作業の効率と安全性は十分ではない。最近、ウォーターフロント開発にともなう人工島建設など港湾工事現場の水深が深くなってきており、危険性の増大と作業効率の低下が問題となっている。さらに、潜水士数の減少が状況を悪化させている。このため水中調査作業のロボット化が要請されている。

これに応えるため運輸省では歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の開発を開始した。アクアロボは防波堤建設に伴う調査作業に適した2つの機能を持っている。ひとつは捨石マウンドの凹凸を歩行中の脚の動きから測定する機能である。もうひとつは水中構造物をテレビカメラにより観察する機能である。アクアロボは海底に着底しているので画面が安定しており画面上で計測を行なうことも可能である。

図-1に捨石マウンドの凹凸測定を行っている状態、図-2にケーソン据付け工事の監視を行なっている状態の模式図を示す。

この研究は1984年に開始され現在までに3機を製作した。1985年に製作した1号機は陸上用実験機である¹⁻²⁾。1987年に製作した2号機はプロトタイプである³⁻⁹⁾。1989年に製作した3号機は軽量タイプである。

現在までにアクアロボ2号機を用いて3回の海中歩行実験を行い、実用に十分な性能を持つことを確認した。本稿ではアクアロボ2号機による3回目の海中歩行実験を中心に述べる。

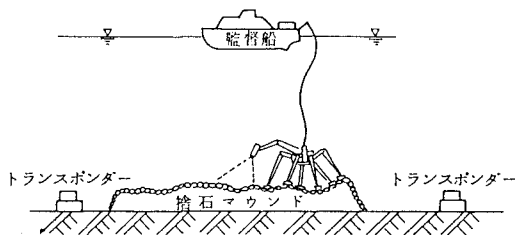


図-1 捨石マウンドの凹凸測定の模式図

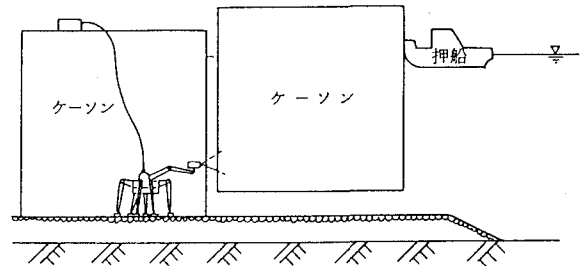


図-2 ケーソン据付け工事の監視の模式図

2. 形式の選定

潜水士に代わって水中調査作業を行うロボットは安定性と位置保持性に優れ、かつ、凹凸のある海底面上を移動できる能力が必要である。この目的には遊泳式に比べて海底走行式の方が適している。海底走行式には車輪式、キャタピラ式、スクリュース式、歩行式がある。

車輪式は構造が簡単で走行速度が速いため陸上用の走行装置の大部分を占めているが、海底用として考えると凹凸面に対する適応性が小さく方向転換が容易ではない。キャタピラ式は凹凸面に対する適応性が良く安定性も大きい。底質の巻上げが大きく水中TVの使用時に視界を妨げる。また、構造が複雑であり重量が大きくなる。スクリュース式は構造は簡単であるが、本来摩擦の小さい軟弱地盤上や氷上での使用のために開発された形式であり、摩擦の大きい岩盤上の走行には適していない。以上に対して歩行式は、本体寸法の割に凹凸面適応性が大きく、接地面積が小さくできるので濁りの発生も少ない。また、方向転換も容易である。さらに、本体を常に水平に保持することが可能で各種調査機器の使用に適している。以上の理由により水中調査ロボットの形式には歩行式がもっとも適している。

歩行式ロボットを脚の形状で分類すると、脚が常にほぼ垂直方向に向いているほ乳類型と、脚の関節の動作角

度の大きい昆虫型がある。一般に昆虫型の方が本体寸法に比べて脚の動作範囲が大きいので、同一寸法であればほ乳類型に比べて歩行可能な凹凸は大きい。このため小型の監督船に搭載するためには昆虫型が適している。

歩行式ロボットを制御方式で分類すると、メカニカル制御方式とソフトウェア制御方式に分けられる。メカニカル制御方式はリンク機構等を用いて機構学的に脚の歩行運動を行うものである。ソフトウェア制御方式は各脚の各関節を機械的に独立させ、コンピュータのプログラムにより各脚を協調制御して歩行運動を行うものである。メカニカル制御方式は運動の自由度を下げ、制御用コンピュータの負担を小さくするので、高速化が可能となる反面、歩行の自由度が小さく凹凸面上歩行は困難である。また、組となる脚の相互位置を変えることができないので危険領域を避けて選択的に接地することは不可能である。ソフトウェア制御方式は各脚を別々に独立して動かせるので、選択的に接地する歩行が可能である。ソフトウェア制御方式は計算量が膨大でプログラムが複雑になるため歩行速度が遅くなりがちであった。しかし、最近では高速大容量のCPUが利用できるようになってきている。また、この方式では凹凸地形に適応するため常に脚の位置を計算して制御するので、脚の接地点の軌跡から地形の凹凸を測定することができるという利点がある。

静的に安定な歩行ロボットの脚の本数は4本、6本、8本が考えられる。4本のものは1回に上げる脚が1本であるので歩行速度が遅い。6本、8本のものは半数の脚を交互に動かせるので高速歩行が可能である。6本と8本を比較すると、脚の少ない6本の方が制御は簡単であり、脚が干渉しにくいので脚の動作範囲を広くとることができる。交互踏変え歩行パターンでは8本の方が接地本数が多く安定性が良いが、ソフトウェア制御方式であれば6本のものでも4脚接地歩行や5脚接地歩行が可能であるので接地脚数をふやすために8本にする必要はない。また、静的歩行速度と安定余裕は6本までは急速に増加するが8本にしてもほとんど変化しない。以上により歩行式ロボットとしては6脚のものが最も実用化に適している。

6脚歩行式は胴体の両側に3本ずつ脚を有している面対称型のものと、60度ごとに脚を有する軸対称型のものが考えられる。軸対称型のものは方向性がないので、各方向への移動が同等に行えることと、その場での方向転換が容易であり、海底の地形に応じて機敏に移動する必要のある水中調査ロボットに適している。

動力源としては、油圧は出力は大きい動力ユニットも含めると重量が大きくなるため、コンピュータ制御に適した電動式を採用することにした。

一般に歩行式ロボットは胴体にアクチュエータを搭載しているものが多いが、水中調査ロボットでは駆動トルクを軽減するためにアクチュエータを脚部に配置することにした。これは、腕の先で物を持つ産業用ロボットと異なり、歩行式ロボットは足先を支点として本体を支えるので胴体よりも足先に近い脚部に重量を配分した方が関節に生じるモーメントを小さくできるためである。この方式を採用することにより胴体には各種調査機器用のスペースを確保することができ、また、防水化の容易な構造とすることができるという利点も生じる。

以上の考察から、アクアロボの形式は軸対称6脚式昆虫型ソフトウェア制御歩行ロボットとし、電動モータを脚内に収納する構造とした。

3. アクアロボの概要

3.1 ハードウェア

アクアロボの各脚は3つの関節を有し、各関節は脚の内部に装備されたDCサーボモータにより減速機のみを介して駆動される。

脚の協調動作はコンピュータのソフトウェアで制御される。各脚の先端には接地センサが装備され、胴体内には傾斜センサ2個、方位センサ1個、圧力センサ1個が装備されている。これによりアクアロボは凹凸のある地面上を歩行することができる。また、歩行中の脚先端の運動を記録することにより歩行面の凹凸測定が可能である。

ロボット本体は光電力複合ケーブルで母船上の制御装置と接続される。

アクアロボ2号機の外観を写真-1、寸法とセンサ位置を図-3、仕様を表-1に示す。

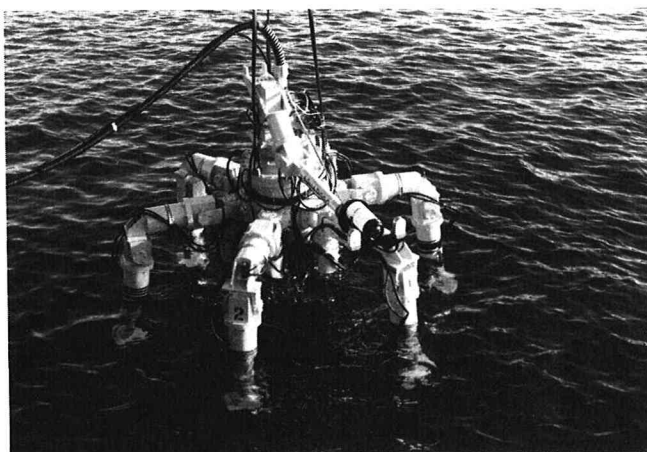


写真-1 アクアロボ2号機

表-1 アクアロボ2号機(改造後)仕様

ロボット本体	
型式	軸対称6脚歩行式昆虫型(各脚3関節)
関節駆動方式	DCサーボモータによるセミダイレクトドライブ
制御方式	パーソナルコンピュータによるソフトウェア制御
歩行可能凹凸	±35cm
防水性能	水深50m
主要材質	耐食アルミニウム
重量	約857kgf(空中)、約430kgf(水中)
寸法	胴体:直径50cm高さ77cmの円筒形 脚長:胴体側50cm、足先側100cm 足部:直径45cm、厚さ8.5cm 足首可動角度:±25度(全周)
関節数	脚18、マニピュレータ3 合計21
モータ出力	脚 第1関節180W、第2・3関節280W マニピュレータ 第1・2・3関節とも100W
使用センサ	接地センサ6(脚先端) 傾斜センサ2、方位センサ1(胴体内部) 水深センサ1(胴体底部)
マニピュレータ	関節数3、旋回範囲±180度以上
制御装置	
寸法・重量	1230×1600×800(mm) 250kgf
前面パネル	関節電流、傾斜センサ、方位センサ、水深センサの値の表示器及び端子、FINISH信号表示器
計算機	16bitパーソナルコンピュータ(CPU180286)
光電変換装置	変換信号 テレビ画像信号用 1本
	エンコード信号用 5本 (1本あたり5kHz以下の5個のエンコード信号を多重通信)
	ファイバ センサー信号用 1本 (アナログ信号4、16接点信号1)
	予備 1本
複合ケーブル	
寸法	直径42mm×長さ100m
単位長さ当り重量	1660g/m(空中) 370g/m(水中)
比重	約1.28
許容張力	1500kg

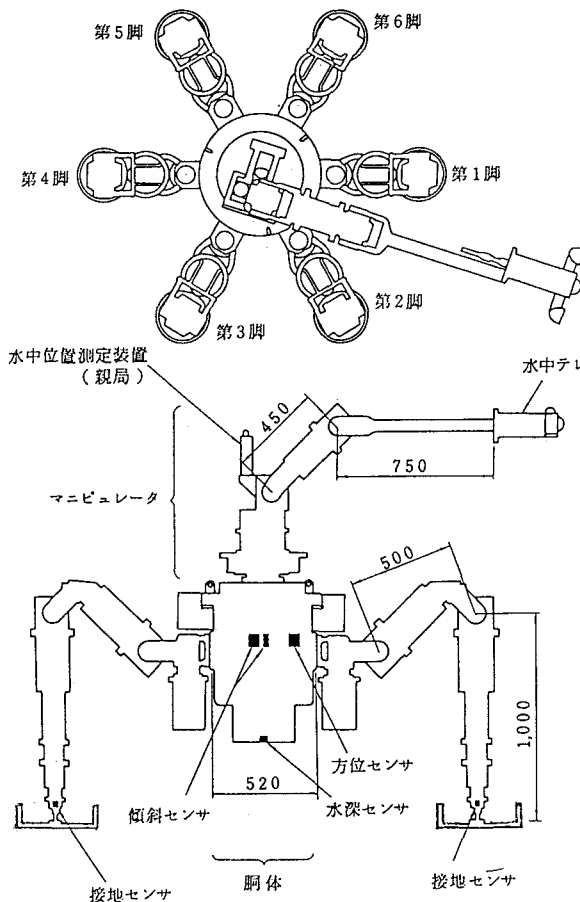


図-3 アクアロボ2号機の寸法とセンサ位置

3.2 ソフトウェア

任意の凹凸面上を歩行するためには、リアルタイムでセンサ情報を処理し、地形に合わせて脚の運動を行なう必要がある。ところが、アクアロボは回転する関節を持つので脚先を同期させて直線運動させるためには膨大な計算量が必要である。このため特殊なアルゴリズムを考案し処理速度を早めている。

ロボット制御プログラムは、制御システムプログラムと歩行アルゴリズムプログラムに階層化されており、それらは互いに独立している。制御システムプログラムと歩行アルゴリズムプログラムはロボット言語によりインターフェースされている。ロボット言語が直線補間計算とモータ回転の同期をリアルタイムで行う部分である。

アクアロボは操縦型のロボットではなく、事前にロボットに指令を与えておくでロボットが自分の判断で歩行する知能移動ロボットである。このため操作は非常に容易である。基本操作は、誘導なしの場合は歩行方向と歩行距離、誘導ありの場合は歩行目標点の座標値を与えるようになっている。どちらの場合もアクアロボは各種センサからの情報を用いて胴体を水平に保ちながら凹凸地形上を自律的に歩行する。歩行パラメータの調節、接地不能な場合の再接地など判断機能を備えており歩行中の操作は必要としない。アクアロボの動作はコンピュータのディスプレイに常にグラフィック表示される。

4. 搭載機器

4.1 水中位置測定装置

水中位置測定装置としてロングベースライン方式の超音波式トランスポンダを搭載するようになっている。

水中位置測定装置の仕様を表-2に示す。リニアFM信号を伝搬方式として採用し、変調方式にパルス圧縮方式を採用して多重反射を軽減させることにより、高精度を実現した。

表-2 水中位置測定装置仕様

測定方式	ロングベースライン(LBL)方式
送信周波数	40kHz~70kHz
送信出力	親局500W、子局50W
伝搬方式	リニアFM
変調方式	パルス圧縮方式
測定範囲	300m以内
測定精度	±0.1m
分解能	0.01m

4. 2 水中テレビカメラ

アクアロボ2号機の胴体上には3自由度のマニピュレータを装備しており、先端に水中テレビカメラを取り付けるようになっている。専用水中テレビカメラとして光学式水中テレビカメラと超音波計測装置を組み合わせたものを2種類開発した。

ひとつは、パルスエコー方式の超音波距離計を組み合わせたものである。カメラから被写体中心までの距離を測定しレンズの画角から計算することにより、水平及び垂直方向のスケールを水中テレビ画面にスーパーインポーズ表示しカーソルを用いて被写体の寸法を測定する機能を備えている。

もうひとつは、超音波ビームを電子掃引することにより被写体の中央部を水平方向に分割して距離を測定する装置を組み合わせたものである。被写体の凹凸形状を水中テレビ画面に表示する機能を備えている。この超音波凹凸形状計測装置付き水中テレビカメラの外観を写真-2に示す。



写真-2 超音波凹凸形状計測装置付き水中テレビ

5. 海中実験の概要

アクアロボ2号機を用いて、今までに3回の海中歩行実験を行っている。

1回目の海中歩行実験は1987年12月2～11日で、海中歩行性能の実証、超音波距離計付き水中テレビカメラによる観察を行なった⁵⁾。歩行速度は毎分20～30cm程度であった。この実験結果により関節用アクチュエータの高出力化と足部形状変更などの改造を行なった。

2回目の海中歩行実験は1989年3月6～13日で、誘導歩行、凹凸測定、超音波凹凸形状計測装置付き水中テレビカメラによる観察を行なった⁶⁾。歩行速度は最大毎分1mであった。

1回目と2回目の実験場所は、横須賀港安浦地区の潜水士がならし作業を行なった捨石マウンド上で、水深は約6mである。

以上によりアクアロボ2号機の基本的な歩行性能が確認されたので、3回目の海中歩行実験は、実用機の使用目的である、機械でならし作業を行なった水深20mを越える捨石マウンド上で実用化可能性の確認を行なうことにした。

3回目の海中歩行実験は1990年2月14～23日で、誘導精度、歩行速度、凹凸測定精度、操作性を中心として行なった。⁹⁾

実験場所は岩手県釜石港泉作業基地で、平均水深は24mである。実験区域は42×77mの広さで釜石港湾口防波堤建設のためのケーソンヤードに隣接している。この場所は製作したケーソンを据付けまで置いておくための仮置き場であり、海底は捨石ならし機を用いてならされた捨石マウンドである。使用した捨石ならし機は運輸省第二港湾建設局が開発したものである。

実験はクレーン台船を用いてロボットを海底に吊り降ろして行なった。写真-3にアクアロボ2号機が機械でならした捨石マウンド上を歩行している状態を示す。

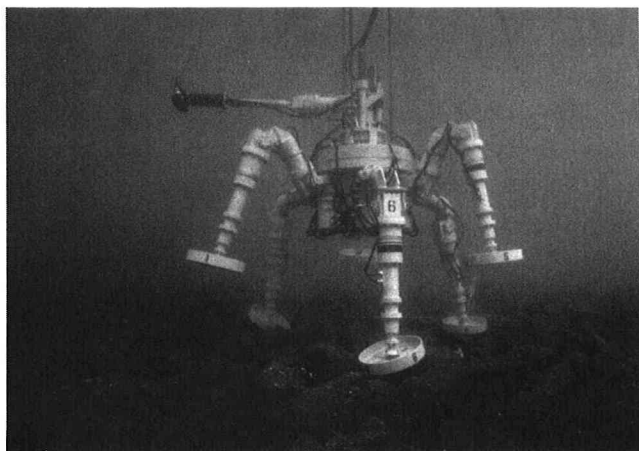


写真-3 アクアロボ2号機の海中歩行状態

6. 実験方法と実験結果

6. 1 誘導精度

誘導精度実験は、捨石マウンド上の2箇所に目印として鉄板を設置し、その間を誘導歩行させて行なった。鉄板の位置はスタッフを立てて陸上からトランシットで測定した。鉄板間の距離は10mである。トランシット測量による鉄板位置の座標を歩行目標点として入力して鉄板間を歩行させ、歩行終了時の位置を測定した。

実験結果を表-3の上4行に示す。すべて水中位置測定装置による測定値である。誤差は±15cm以内であり、海中ロボットとしてはかなり良い性能と言える。潜水士及びロボットに搭載したテレビカメラによる撮影でも、

歩行終了時にロボットの胴体が鉄板の真上にあることが確認された。表－３の下２行は鉄板以外の点へ誘導した場合の参考データである。水中位置測定装置はロングベースライン方式であるためベースライン付近では位置測定精度が悪くなる傾向がみられた。

6. 2 歩行速度

歩行速度は、足を上げる高さ、歩幅、コンピュータからのパルス出力速度、歩行面の凹凸状態によって変化する。表－３には歩行速度の実験結果も示してある。ここでパルス速度は基準のパルス出力速度に対して間引きにより遅延させている割合を示す。

最大歩行速度は毎分 1. 43 mであった。潜水士による 5 mピッチの凹凸測定は 1 点 5 分程度と言われていることを考えると、アクアロボ 2 号機は人力作業と同等以上の作業性を有していると言えることができる。

水槽内平面上での歩行実験では毎分 6. 5 mを記録しており、陸上用歩行ロボットと比較できる速度である。水中ということを考慮すればアクアロボの歩行速度は限界に近いレベルに達していると考えられる。

表－３ 歩行実験結果

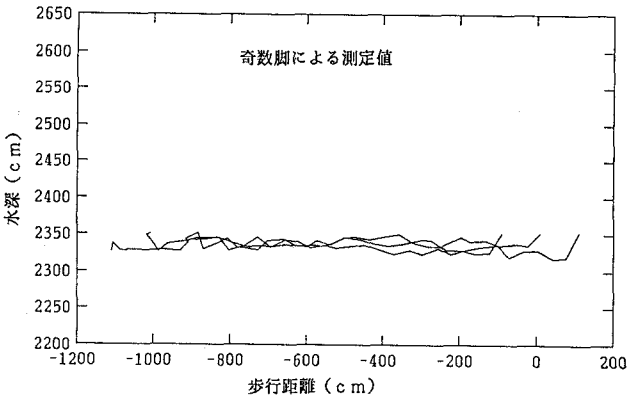
パルス速度	歩幅 (cm)	歩高 (cm)	歩行目標点 (cm)	歩行終了点 (cm)	誤差 (cm)	距離 (m)	速度 (m/分)
1/3	15	35	X34821	X34816	-5	10	0. 61
			Y-7251	Y-7264	-13		
1/3	20	35	X35029	X35044	+15	10	0. 67
			Y-8232	Y-8218	+14		
1/2	15	35	X34821	X34822	+1	10	0. 67
			Y-7251	Y-7249	+2		
1/2	20	35	X35029	X35037	+8	10	0. 76
			Y-8232	Y-8231	+1		
1/2	20	25	X32810	X32811	+1	20	1. 27
			Y-7371	Y-7350	+21		
1/2	20	25	X33000	X32981	-19	5	1. 43
			Y-7500	Y-7504	-4		

6. 3 凹凸測定結果

歩行面の凹凸測定結果の一例を図－４に示す。

歩行面の相対的な高さは脚の動きを積算することによって求めた。水深の絶対値はこの相対高さを歩行開始点と歩行終了点における水圧センサの測定値で補正することによって求めた。

測定値のばらつきは 56 cmの範囲に収まっていた。実験区域の潜水士による 30 cmピッチの凹凸測定結果は最大で ± 30 cmであったので、この凹凸測定値は妥当であると考えられる。

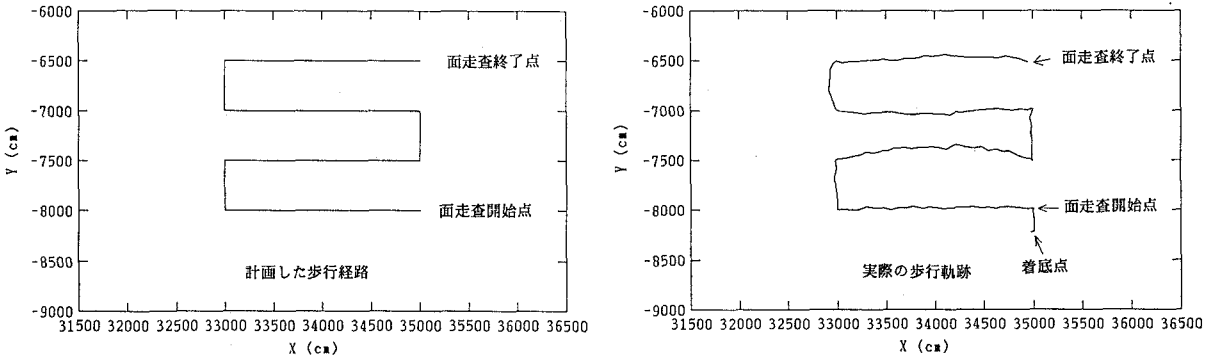


図－４ 凹凸測定結果

6. 4 面走査歩行

アクアロボは、オペレータが凹凸測定を行いたい区域を指定するとその区域内の一定間隔の直線上を自動的に歩行しながら凹凸測定を行なう機能を持っており、これを面走査歩行と称している。

図－５に面走査歩行の一例を示す。左側は計画した歩行経路、右側は水中位置測定装置で測定した実際の歩行軌跡である。この実験ケースでは、着底点から面走査歩行開始点までを除く総歩行距離は 95 mである。歩行に要した時間は水中位置測定装置の休止時間を除いて 72 分であったので、平均歩行速度は毎分 1. 32 mである。



図－５ 面走査歩行の軌跡

6. 5 砂地盤上歩行

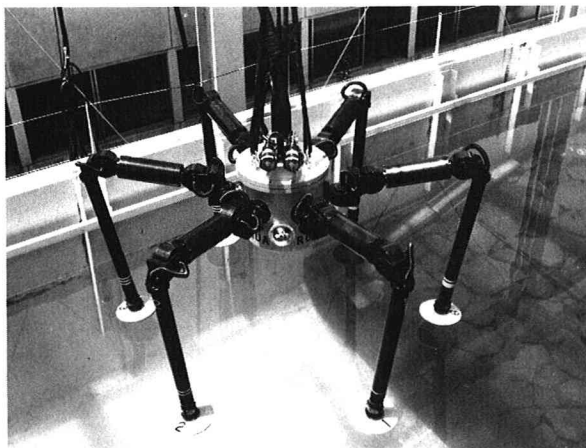
本来の実験目的ではなかったが捨石マウンドの横に砂の原地盤があったので歩行実験を行った。特に問題なく歩行できた。アクアロボ 2 号機を最初に砂地盤上に着底させた時にはかなり底質を巻き上げたが、ロボット本体が完全に見えなくなることにはなかった。歩行中の濁りは着底時よりは少なく、胴体中央部分までであった。歩行式ロボットは接地面積が小さく、接地点が離散的なので底質の巻き上げによる濁りが少ないと考えられていたが、この実験でそのことが実証された。

7. アクアロボ3号機

1988～1989年には軽量化を図った3号機を製作した。外観を写真－4、仕様を表－4に示す。

これは、アクチュエータ及び減速機の配置を見直し、関節を小型軽量化し脚部を細くしたもので、2号機と同一脚長でありながら大幅な軽量化に成功した。関節の小型軽量化、防水区画の減少、全関節の同一構造化が特徴である。マニピュレータは装備せず、テレビカメラを胴体に内蔵している。また、関節と胴体を接続するケーブルを脚の内部に収納するように設計しており、浮遊物の多い港湾区域での信頼性を高めている。

軽量化の目的は、クレーンなどの支援システムの簡素化と歩行の高速化である。流体抵抗と慣性質量が減少したため、水槽内平面上での歩行実験では毎分8.9mの歩行速度を達成している。



写真－4 アクアロボ3号機

表－4 アクアロボ3号機仕様

型式	軸対称6脚歩行式昆虫型（各脚3関節）
関節駆動方式	DCサーボモータによるセミダイレクトドライブ
制御方式	パーソナルコンピュータによるソフトウェア制御
歩行可能凹凸	±35cm
防水性能	水深50m
主要材質	耐食アルミニウム
重量	約280kgf（空中）、約100kgf（水中）
寸法	胴体 直径43cm高さ45cmの円筒形 脚長：胴体側50cm、足先端側100cm
関節数	脚18
モータ出力	脚 第1・2・3関節とも100W
使用センサ	接地センサ6（脚先端） 傾斜センサ2、方位センサ1（胴体内部） 水深センサ1（胴体底部）
テレビカメラ	胴体内蔵式
制御装置	2号機と共通

8. 結論

歩行ロボットの研究はさかに行なわれているが、現在陸上用に試作されている歩行ロボットの性能は実用には不十分のように思われる。しかしながら、アクアロボは3回の海中実用化試験で実用的な歩行性能を持つことが確認されており、操作も自動化されている。

海中では防水や腐食の問題はあるが、ケーブルの使用が困難でないで動力を積む必要がなく、また、浮力により自重が減少するという利点もある。このように歩行ロボットの欠点を補える使用環境に適用したこと、凹凸測定のような歩行ロボットでなければできない機能を持たせて、潜水士に代わる調査作業に使用目的を絞った点がアクアロボの開発が順調に進んでいる要因である。アクアロボは歩行式としては初めての実用ロボットになると考えている。

最近の歩行ロボット研究の動向を見ると、アクアロボと同様の6脚軸対称型が多く見うけられるようになってきており、この形式の優位性が認知されてきた。アクアロボで確立した技術は、水中以外にも宇宙、放射線等の悪環境用にも適用できるのではないかと考えている。

参考文献

- 1) 秋園純一：水中調査ロボットの開発の現状と課題，1986年11月，土木学会第5回建設用ロボットに関する技術講習会「情報化施工とロボット化への展望－水中施工編－」テキスト，pp.13～25
- 2) 昭和61年度水中調査ロボットの実験調査報告書，運輸省第二港湾建設局，1987年3月，68p.
- 3) Mineo IWASAKI et al., Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection, Report of the Port and Harbour Research Institute Vol.26 No.5, Dec.1987, pp.393～422
- 4) 土質・基礎分野の建設ロボット，土と基礎第36巻第1号，1988年1月，土質工学会
- 5) 昭和62年度水中調査ロボット現地実験調査報告書，運輸省第二港湾建設局，1988年3月，70p.
- 6) 昭和63年度水中調査ロボット実験調査報告書，運輸省第二港湾建設局横浜機械整備事務所，1989年3月，70p.
- 7) 市原正史：歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の開発，建設機械vol.25.No.10，1989年10月，日本工業出版，pp.52～56
- 8) 酒井浩：港湾建設におけるロボット化技術について，土木学会誌第75巻第2号，1990年2月，土木学会，p.27～29
- 9) 平成元年度水中調査ロボット実験調査報告書，運輸省第二港湾建設局横浜機械整備事務所，1990年3月