

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1236 September 2011

海岸および港湾整備にかかる水中作業の無人化に関する研究

田中 敏成

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. 序論	4
2. 海岸および港湾整備における水中作業の現状	5
2.1 建設業における労働災害	5
2.2 水中作業が想定される海岸および港湾整備事業	5
2.3 水中作業の事例	9
2.4 水中作業の無人化に向けた提案	13
3. 海岸整備にかかる水中作業の無人化手法の開発 ―浸食海岸の汀線測量作業―	15
3.1 新潟西海岸における汀線測量作業	15
3.2 測量ロボットのハードウェア	16
3.3 測量ロボットのソフトウェア	23
3.4 汀線測量実験	33
3.5 提案手法の導入効果に関する考察	38
4. 港湾整備にかかる水中作業の無人化手法の開発 ―海洋浮体構造物の係留装置の点検作業―	39
4.1 現状の係留装置の点検手法	41
4.2 画像計測	41
4.3 GPS波浪計の係留装置への生物の付着状況調査	42
4.4 水槽試験機の開発	44
4.5 水槽試験	46
4.6 作業条件および点検システムの仕様の検討	50
4.7 提案手法の導入効果に関する考察	54
5. 結論	54
謝辞	55
参考文献	56

A Study on Unmanned Underwater Operation Systems in Coastal Work

Toshinari TANAKA*

Synopsis

Various and detailed work are required on the construction work site. Because most the work are actions on natural objects under native environments, and even the states of artifacts are change as the progress of work. Construction work are great different from factory work which are easy to set up the working conditions and easy to standardize. Therefore above-mentioned is contributes to human-intensive construction work. Especially, even mechanizations of coastal work which are underwater work for coast and port improvement still are limited and are diver-intensive because these work are constrained by underwater visibility, crowded structures, disturbances like wave and current, and so on. However, extended underwater operations put a great physical strain on divers, and the work conditions are severer than that on land in many circumstances. And, they are difficult to detect and to avoid the danger of accident because of numerous ships come-and-go in port area. Therefore, unmanned underwater work should be considered fundamental solution for above-mentioned various problems because the underwater accidents become life-threatening serious situations in most cases.

In this paper, present situation of the coastal work will be described. And, proposed unmanned approaches for two cases of the enumerated underwater work are “shore line survey in erosive coast” and “maintenance examination for mooring facility of massive floating structure”, which will be described. Purposes of this study are not only realization of the unmanned approaches but also contribution to future similar approaches through provisions of the process sequences under certain conditions with specific cases. In this study, approaches for unmanned underwater operating systems are not limited to automated technologies. Tele-operation technology utilizing superior great human abilities which considered the characteristic conditions is treated as valuable fundamental technology.

In addition, this paper is the author’s republished doctoral dissertation which is formatted to fit the technical note of the port and airport research institute.

Key Words: Underwater work, Unmanned approaches, Unmanned underwater operating systems, Automated technology, Tele-operation technology

* Researcher, Sensing and System Technology Group, New Technology Development Field
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 E-mail:tanaka_t@pari.go.jp

海岸および港湾整備にかかる水中作業の無人化に関する研究

田中 敏成*

要 旨

建設作業の多くは、自然環境下における作業であったり、作業対象そのものが自然物であったり、あるいは人工物であっても作業の進展によってそれらが変化してゆくことから、作業現場ではこれらに対応して多岐にわたる複雑な作業が要求される。これは作業条件の設定や作業の規格化が比較的容易な製造業の工場内などとは大きく異なる点であり、建設業が人力に大きく拠らなければならない一因となっている。とりわけ海岸や港湾整備にかかる水中作業では、海域の透明度、入り組んだ構造物、波浪や潮流等による外乱など様々な条件に制約されていまだ機械力の導入自体が限定的であり、潜水士による水中作業に大きく依存しているのが現状である。しかしながら、長時間の潜水作業は肉体への負担が大きいことから、その労働条件は陸上に比べて過酷な面が多い。また、港内では行き交う船舶も少なくないことから危険の察知や回避が必ずしも容易ではない。ひとたび事故が起これば生命に関わる重篤な事態になりかねないことから、水中作業の無人化はこれらの諸問題に対する根本的な解決手段といえる。

本論文では、海岸および港湾整備における水中作業の現状を示し、ここで列挙した水中作業事例のうちから海岸および港湾整備事業にかかる「① 浸食海岸の汀線測量作業」、「② 海洋浮体構造物の係留装置の点検作業」の二種類の作業についてそれらの作業の無人化手法を提案し検証した。本研究の目的は、ここで取り上げた二種類の作業についての無人化手法を実現することと同時に、所定の環境条件下における特定の水中作業の無人化手法を実現する一連のプロセスをその具体例をもって示すことで、今後実施される同様の取り組みに資することである。また、ここでの水中作業システムのための無人化技術とは自動化技術だけに限定するものではなく、港湾域特有の作業条件を考慮して人間の優れた能力を活用しながらそれを補助する特徴的な遠隔操作技術も重要な基盤技術として取り扱った。

なお、本稿は著者の博士学位論文の書式を変更し、港湾空港技術研究所資料として発表するものである。

キーワード：水中作業，無人化，水中作業システム，自動化技術，遠隔操作技術

* 新技術研究開発領域計測・システム研究チーム研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 E-mail:tanaka_t@pari.go.jp

1. 序論

建設作業の多くは、自然環境下における作業であったり、作業対象そのものが自然物であったり、あるいは人工物であっても作業の進展によって作業対象の状態が変化してゆくことから、作業現場ではこれらの変化に対応して多岐にわたる複雑な作業が要求される。これは作業条件の設定や作業の規格化が比較的容易な製造業の工場内などとは大きく異なる点であり、建設業が人力に大きく拠らなければならない一因となっている。この傾向は陸上の建設現場に限ったことではなく、水中作業が主となる港湾工事においても同様である。

例えば、代表的な港湾工事である防波堤の築造工事では、防波堤の本体となるケーソン（鉄筋コンクリート製の巨大な箱）を安定して設置するために、海底に捨石マウンドと呼ばれる堅固な石積みによる基礎部の構築を行う。日本における防波堤はこのような捨石マウンドとケーソンを組み合わせた混成堤がほとんどである（Fig.1.1）。

これは海上から捨て込まれる割栗石を海底で平らに均す重作業であるが、従来から主に作業潜水士により行われてきた。1980年代の後半以降、この作業に対しては大規模な防波堤築造工事現場向けに種々の捨石均し機の導入が積極的に試みられ大いにその役割を果たしてきたが、工事の規模やコストなどの制約からその活躍の場が限定的であったことは否めない。その後、より汎用的な潜水士搭乗型の水中バックホウの導入も進められ現在に至っているが、目視による機側操作であることから作業の可否や作業能率は海域の透明度に大きく依存している。その結果、高い透明度が期待できない港湾域では水

中バックホウの利用に制約を伴い、現在においても作業潜水士による人力均し作業が相当の割合で行われている（Fig.1.2）。

また、従来からの防波堤や空港などの新規施設の整備に加えて、高度経済成長期に整備された多くの施設が耐用年数に近づいている現在、今後はアセットマネジメントの観点から既設の水中施設に対する膨大な点検・診断、維持・補修作業の発生が予想される。これらの作業の増加に伴い作業内容は一層多岐にわたることとなるが、これらを安全かつ効率的に実施することがこれまで以上に求められることとなる。

これらの作業への機械力の導入は強く要請される場所であるが、その導入は海域の透明度、錯綜する構造物、波浪や潮流等による外乱など、港湾域特有の様々な条件に制約され現在のところ限定的である。しかしながら、長時間の潜水作業は肉体への負担が大きいことから、その労働条件は陸上に比べて過酷な面が多いだけでなく、港内では行き交う船舶も少なくないことから危険の察知や回避が必ずしも容易ではない。ひとたび事故が起これば生命に関わる重篤な事態になりかねないことから、水中作業の無人化はこれらの諸問題に対する根本的な解決手段といえる。

そこで本論文では、海岸および港湾整備事業の現状を示し、そこで列挙した水中作業事例のうちの2件についてその作業の無人化を図り、そのプロセスの詳細を記述することとした。なお、ここでの無人化技術とは自動化技術だけに限定するものではなく、港湾域特有の作業条件を考慮して人間の優れた能力を活用しながらそれを補助する特徴的な遠隔操作技術も重要な基盤技術として取り扱った。

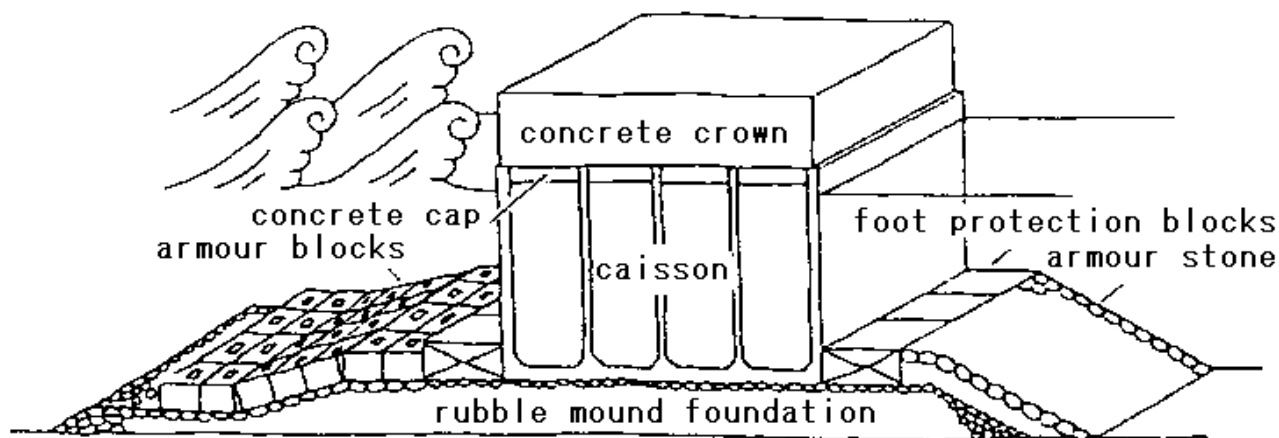
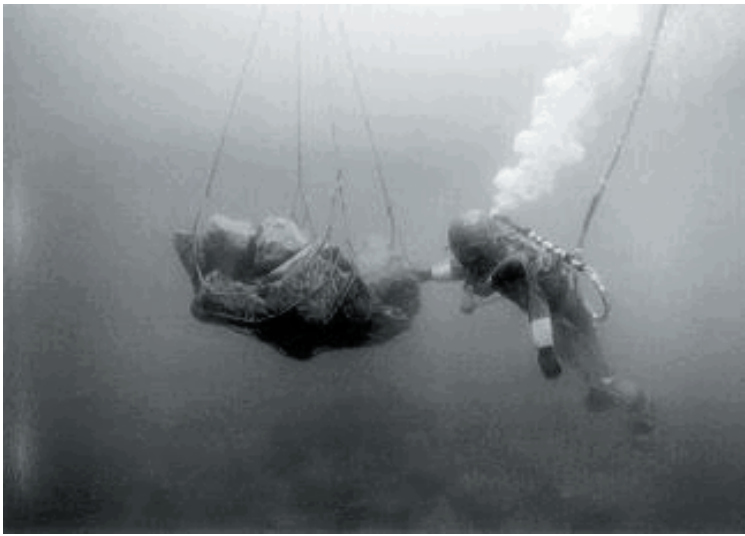
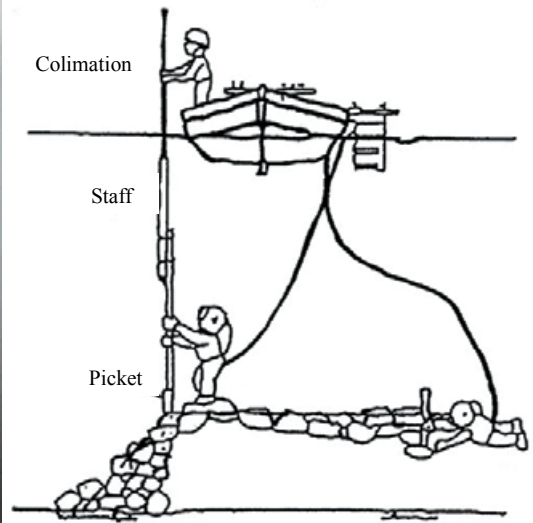


Fig.1.1 Image of typical break water “composite breakwater” in Japan.



a) Trimming work



b) Survey work after the trimming

Fig.1.2 Underwater operations of trimming work of rubble mound.

2. 海岸及び港湾整備における水中作業の現状

海岸および港湾整備事業においては建設作業だけではなく、陸域から水際線、水中部に至るあらゆる領域で建設作業、測量や調査作業、構造物の点検作業などの多岐にわたる様々な作業が実施されている。ここではまず、建設業全体における労働災害の実態について述べる。続いて水中作業に焦点を絞ってそれらの作業事例を列挙し、それらの作業の無人化に向けた現状の課題を述べる。

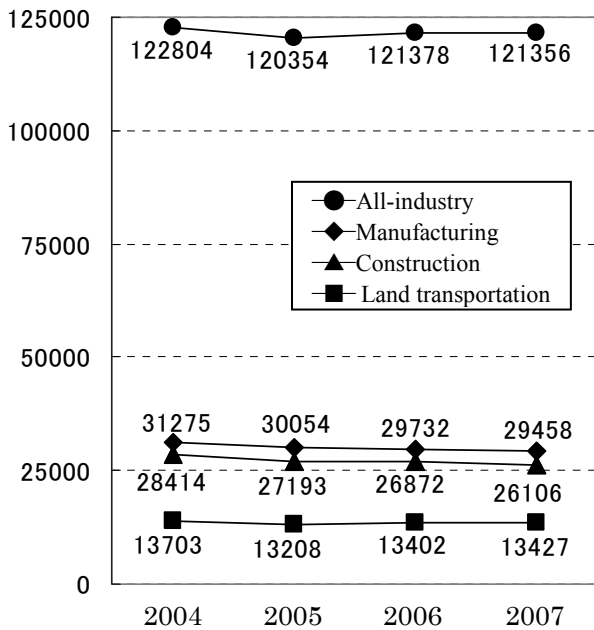
2.1 建設業における労働災害

安全衛生年鑑平成 17 年版（平成 20 年 5 月現在最新）によれば、平成 16 年（1～12 月）の労働災害による休業 4 日以上死傷者数は 122,804 人であった¹⁾。業種別で見ると、製造業の 25.5%と建設業の 23.1%が拮抗しており、この二業種で全体の約半数となる 48.6%を占めている。また、この年の労働災害による全死傷者数のうち死亡者数は 1,620 人であり、業種別では建設業が全体の 36.7%を占めて最も多い。この年の建設業就労者 584 万人が全就労者に占める割合が 9.2%であることを考えると、この 36.7%は決して低い数字ではない。また、安全衛生情報センターの労働災害統計における労働災害発生速報から平成 17 年以降の同傾向を見てもこの傾向は大きく変化していないことから、建設業はいまだいわゆる 3K 産業的な側面を持つ業種であることは否定できない (Fig.2.1)²⁾。

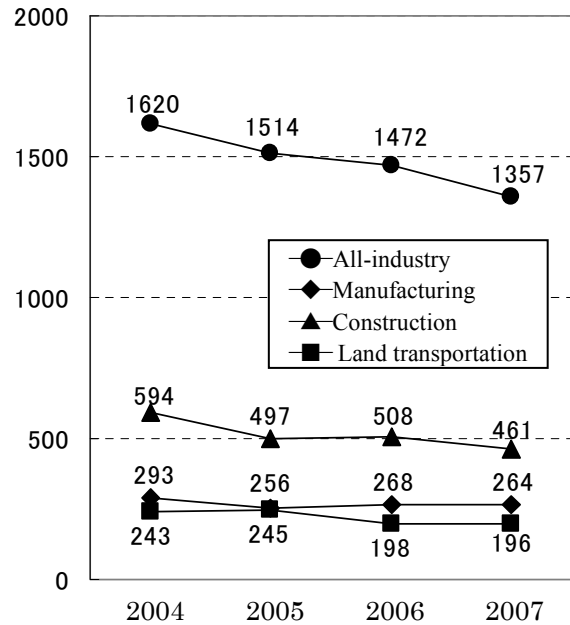
しかしながら、建設業は人力に大きく依存する産業である一方で、機械力の導入を積極的に推し進めてきた産業の一つでもある。ここでの機械力は施工管理や建築作業への導入も試みられているものの、主は一般土木作業や搬送作業に代表されるかつての重労働、重作業に対応するものであり、これらの導入が作業能率の飛躍的な向上に繋がってきたことは言うに及ばない。昭和 36 年をピークとして、以降減少傾向にある労働災害の発生件数はこれらの恩恵を少なからず受けているものとも考えられるが、一方で近年ではその減少傾向に下げ止まりの感があり、建設業における労災死亡者が全業種中最多である現状は変わっていない。建設業における死亡災害の起因物に目を向けると、他の業種と同様に「墜落・転落」が圧倒的に多く全体の 40%以上を占め、これに「交通事故」、「倒壊・崩壊」、「巻き込まれ、はさまれ」、「激突され」、「飛来・落下物」などが続くが、作業の労苦の程度と危険性は必ずしも連動していない。このような現状を鑑みれば、むしろ冒頭に述べた作業対象や環境の複雑さが労働災害を助長する一因とも考えられ、不注意や安全への配慮の欠如と相まった場合には労働災害を誘発しやすい環境にあると言えよう³⁾。

2.2 水中作業が想定される海岸および港湾整備事業

海岸整備事業は、海岸の保全や背後地にかかる防災対策が主たる事業である。例えば突堤は、沿岸漂砂が卓越する海岸沿いに沖合に向けて数本から数十本程度設置される構造物であり、海岸からの砂の流失抑制や砂浜の成



a) Casualty toll (over 4 days absence)



b) Death toll

Fig.2.1 Generation status of recent occupational accidents

(Plotted the top 3 in the preliminary estimates of occupational accidents which is released on the web site of Japan Advanced Information Center of Safety and Health).

長促進が期待されている。また離岸堤は、海岸から離れた沖合に海岸線に平行に設置される構造物であり、消波効果と砂の流失抑制効果の両方が期待できる。離岸堤はその背後に砂を蓄える傾向にあることから、突堤と同様に砂浜を成長させる効果が期待できる。いずれも人工物の設置によって、沿岸漂砂を積極的に制御して海岸浸食を抑制しようとする試みであるが、浸食の著しい砂浜については人手で直接的に回復させることもしばしばある。これを特に養浜といい、このような砂浜を人工海浜という。以上のような海岸保全のための積極的な施策と合わせて、海浜の定期的な汀線測量などによる砂量の推定や浸食状況の管理が日々行われている。

一方、港湾整備事業は、主に商港や工業港の整備が主たる事業である。港湾整備に際しては、防波堤の築造による港湾施設やその背後地の保護、航路浚渫による水深確保、埋立による用地造成などが挙げられる。近年では、ライフサイクルコストやアセットマネジメントに基づく効率的な施設の維持管理や、地震や津波に対する減災や防災対策、環境アセスメントへの配慮などが重要なキーワードとなっており、これらに配慮した事業が積極的に実施されている。

ここで挙げた海岸および港湾整備事業はこれらの事業

の概略であり、ごく一部に過ぎない。しかしながら、大水深の水中工事現場から砕波帯での調査・測量作業まで、あらゆる作業と場面で水中作業は不可欠となっている。ここで、Table 2.1とTable 2.2に海岸整備と港湾整備それぞれにかかる種々の作業をとりまとめ、それらにかかる人力作業について「◎：水中作業と陸上（船上）作業」、「○：水中作業」、「△：陸上（船上）作業」の3種に分類した。さらに、最右列の「機械化・無人化例」において、水中作業が大いに関わる◎と○については一部ではあるが水中作業の無人化事例を示し、陸上や船上作業が主となる△については主に陸上機械や船舶を示した。よって、△については表中グレーで表示し、本論文中では特段取り扱わないこととした。また、潜水士による水中での作業指示や補助作業は、表中のほとんどの作業や工事で必要とされるため、◎や○の分類には含めないこととした。

なお、ここでの「無人化」とは人力による水中作業を伴わない「水中部無人化」を指し、陸上や船上から機器の遠隔操作によって人による潜水作業を伴わない場合は「水中作業の無人化」として取り扱うものとする。

ここで、表から半分程度の作業で水中作業が不可欠であることが読み取れるとともに、多くの人力による水中作業に対して水中作業の無人化が試みられていることがわ

Table 2.1 Human work in coast improvements.

	作業種別	作業項目	主な作業内容	主な人力作業	分類	利用する装置, 船舶
調査工	潮位及び波浪調査	潮位調査	観測	←	△	調査船
		波浪調査				
	環境調査	水質調査	採水 観測	←	△	調査船
		底質調査	採泥	←	△	
		生物調査	目視 サンプリング	潜水士による目視 サンプリング	◎	水中カメラ, ROV, サンプラー (市販品)
	漂砂及び 海岸線調査・ 浸食対策	漂砂	流況調査 航空写真 レベル測量 音響測深	踏査によるレベル測量	◎	自動汀線測量システム(第3章)
		海岸線				
		汀線測量				
		深淺測量				
	景観調査	←	踏査	←	△	—
維持管理	鋼構造物	目視 肉厚測定	潜水士による目視と肉厚測定	○	非接触肉厚測定装置 (港空研)	
	コンクリート 構造物	目視 空洞探査	潜水士による目視 作業員による空洞探査	◎	空洞探査装置 (北陸地整)	
	機械設備	陸上作業	←	△	—	
施工	堤防	堤防・護岸	地盤改良 玉がけ 据付け 土砂運搬	作業員による玉がけ	△	地盤改良船 起重機(船) 陸上トラック
		胸壁				
		突堤・人工岬				
		離岸堤				
		潜堤・ 人工リーフ				
		消波堤				
		津波防波堤				
		砂浜(養浜, 人工 海浜)				
	コンクリート ブロック	ブロック 設置・撤去	玉がけ 据付け・撤去	作業員と潜水士による玉がけ	◎	網チェーン式ブロック撤去 装置(港空研)
異型ブロック 設置・撤去						
施工管理	品質管理・ 出来形管理	準備工 出来形測量	←	◎	応用で対応	

「分類」の凡例

◎：水中作業と陸上（船上）作業

○：水中作業

△：陸上（船上）作業

Table 2.2 Human work in port improvement.

	作業種別	作業項目	主な作業内容	主な人力作業	分類	機械化・無人化例
調査工	深浅測量	深浅測量	音響測深	←	△	測量船
		水路測量				
	探査工	磁気探査	磁気異常点調査	潜水士による潜水探査	◎	磁気探査船 (各調査会社) ROV (市販品)
		潜水探査	←		○	
	土質調査	←	ボーリング調査	←	△	スパッド台船
	環境調査	流況調査	←	←	△	調査船
		水質調査	採水 観測	←	△	
		底質調査	採泥	←	△	
	維持管理	鋼構造物	目視 肉厚測定	潜水士による目視と肉厚測定	○	非接触肉厚測定装置 (港空研)
		コンクリート 構造物	目視 空洞探査	伝馬船と潜水士による目視	◎	空洞探査装置 (北陸地整), 床版調査 ROV (関東地整, 港空研)
機械設備		水中設備点検	潜水士による点検	○	係留装置点検システム(第4章)	
施工	地盤改良	各種地盤改良	←	←	△	地盤改良船
	防波堤	捨石及び均し	捨石均し	潜水士による人力均し 水中バックホウ搭乗操作	○	遠隔操作水中バックホウ(各 建設会社, 港空研) 捨石均し機(各建設会社)
		ケーソン据付	据付け	←	△	
	コンクリート ブロック	ブロック 設置・撤去	玉がけ 据付け・撤去	作業員と潜水士による玉がけ	◎	網チェーン式ブロック撤去 装置(港空研)
		異型ブロック 設置・撤去				
	係船施設	岸壁	地盤改良 据付け 杭打ち	←	△	地盤改良船 起重機船 杭打船
		栈橋				
		舗装				
	浚渫及び 床掘り	浚渫	浚渫 床掘り	←	△	浚渫船
		床掘り				
埋立及び裏埋	埋立	圧送 土砂運搬	←	△	ポンプ浚渫船 土運船	
	裏埋					
施工管理	品質管理・ 出来形管理	準備工 出来形測量	←	○	アクアロボ(港空研)	

かる。しかしながら、「海岸整備にかかる汀線測量作業」、および「港湾整備にかかる機械設備の維持管理作業」については、水中作業の無人化の実施事例がほとんど見当たらない。その結果、整備局からの要請に応える形で、「海岸整備における汀線測量作業」の水中作業の無人化として「自動汀線測量システム」の開発に取り組み、「港湾整備にかかる機械設備の維持管理作業」の水中作業の無人化として「海洋浮体構造物の係留装置点検システム」の開発に取り組むこととした。

2.3 水中作業の事例

2.3.1 防波堤の築造工事における捨石均し作業

1. 2節でも触れたとおり、防波堤の築造工事は港湾工事の代表的な工事・作業である。

工事では、ケーソンを安定して設置するために、まず海底に堅固な石積みからなる捨石マウンドの構築を行う。これは海上から捨て込まれる30kgから200kg程度の割栗石を海底で平らに均す重作業であるが、従来から主に作業潜水士により行われてきた (Fig.2.2)。



a) Trimming work with crane of vessel



b) Careful trimming work

Fig.2.2 Trimming work of rubble mound by divers.

現在では、潜水士搭乗型的水中バックホウの導入も進められているが、目視による機側操作であることから作業の可否や作業能率は海域の透明度に大きく依存している (Fig.2.3)。その結果、高い透明度が期待できない港湾域では水中バックホウの利用に制約を伴い、現在においても作業潜水士による人力均し作業が相当の割合で行われている。

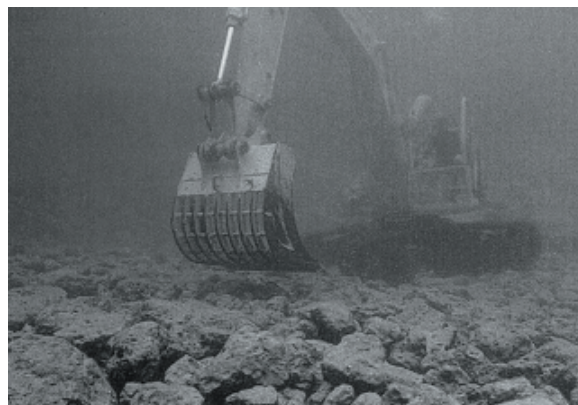


Fig.2.3 Underwater backhoe operated by divers.

そこで港湾空港技術研究所では、海域の透明度に影響されない水中バックホウによる均し作業を目的として、視覚情報に拠らないマスタースレーブ方式の遠隔操作システムを開発した。当該システムでは、水中バックホウのバケットの根元部分にトルクセンサを配することでバケットと捨石との接触を感知し、マスターに反力をフィードバックする。同時に、水中バックホウの位置情報とアームの姿勢情報からマウンド高さを「触像」としてCG描画してオペレータに提示する。これらの情報により、オペレータは水中バックホウの操作状態を直感的に把握できるだけでなく、水中の視覚情報に拠らずとも作業対象である捨石マウンドの不陸状態を把握可能となった⁴⁾。

Fig.2.4 は建設会社が所有する水中バックホウに港湾

空港技術研究所が開発した遠隔操作システムを導入して長崎県の防波堤築造工事現場で捨石均し試験を行った際の様子である。この試験の結果、船上からの遠隔操作であっても潜水士による搭乗操作と同等の作業効率を確認できた。



Fig.2.4 Teleoperation type underwater backhoe using haptic image.

また、水中バックホウによる均し精度は粗均しに相当する $\pm 15\text{cm} \sim 30\text{cm}$ 程度であり、遠隔操作と搭乗操作の違いによる差異はほとんど認められなかった。なお、人力による本均し精度は $\pm 5\text{cm}$ であり、これを実現可能な均し機は現段階では存在しない。

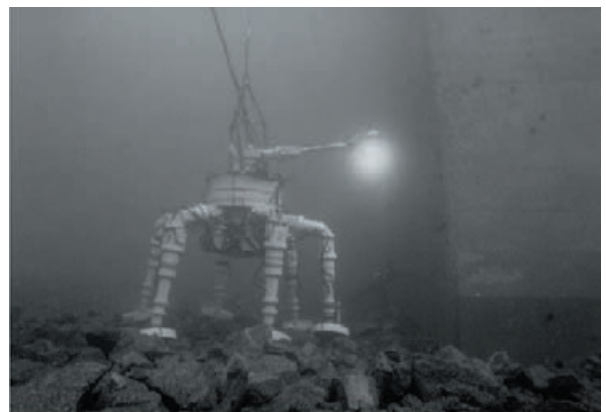
2.3.2 捨石マウンドの出来形測量作業

捨石マウンド上には鉄筋コンクリート製のケーソンを設置することから、マウンド上の大きな凹凸はケーソン底版に応力集中を生じさせ底版損傷の要因となる。よって、ケーソンの設置前には捨石マウンドの凹凸が規定値以内であることを確認する必要がある、マウンド面の均し状態を確認する出来形測量を実施することとなる。出

来形測量の方法としては、精度 $\pm 5\text{cm}$ の本均しに対応可能な測量方法が皆無であることから、未だ **Fig.1.2** に示すような潜水士による水中スタッフを用い測量方法が一般的である。

しかしながら、潜水士の水中での作業可能な時間は水深が深くなるにつれて著しく制限されることから、大水深化が進む防波堤の築造工事現場に対応するためには、捨石マウンドの均し作業と合わせて無人化されるべき作業といえる。そこで 港湾空港技術研究所では、歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」シリーズを開発した。これは有索の6脚歩行式水中調査ロボットであり、マウンド上に設置されたトランスポンダ型 LBL (Long base line) 測位装置と母船上におかれた制御装置によってあらかじめ指示された測線上を自動測量するものである⁵⁾。

Fig.2.5 に開発されたアクアロボ 2 号機とアクアロボ 3 号機を示す。



a) Aqua-robot 2 in the work site of Kamaishi port
(Watertight type test model; 900kg)



b) Aqua-robot 3 (Light & watertight type test model; 280kg)

Fig.2.5 Aqua-robot for underwater inspection of rubble mound.

アクアロボはLBLによる測位情報と脚の設置高から歩行経路上の凹凸を計測するものであり、横須賀港、大阪港、釜石港における計5回の実海域試験で本均しに対応した精度で出来形測量が可能であることを検証した。

なお、アクアロボを利用した出来形測量システムは、ロボット部の他に1t程度の船上装置を必要とすることから、起重機を有する作業台船を母船とする必要がある。このことから、当システムがそのメリットが最大限に発揮するのは、潜水士の作業時間が大幅に制限される水深20m以上の大水深域での大規模な工事現場となる。

2.3.3 杭式栈橋の床版下部点検作業

栈橋構造物はその安全な供用のために、床版裏側や梁のひび割れ、コンクリートの剥離、鉄筋の腐食など、様々な項目について点検が実施されている。その一次点検作業は伝馬船や潜水士によって行われることがほとんどであり、狭隘な栈橋下部に直接人間が立ち入って点検作業を実施している (Fig.2.6)。



a) Small boat



b) Diver

Fig.2.6 Man-powered check of under the piled pier floor slab (Chiba Port).

しかしながら、狭隘な栈橋下では航跡波などの影響から伝馬船や潜水士は常に構造物との衝突の危険にさらされており、安全な作業環境とはいい難い。

近年では当該作業用に専用の擬装を施した ROV を利用した点検作業も試みられている。しかしながら、上部を構造物に塞がれた狭隘な構造物下においては、ROV 自身の位置やその運動状態を把握することが極めて困難であり、しばしばその運用の妨げとなっている。Fig.2.7 に関東地方整備局で利用されている床版調査 ROV を示す。

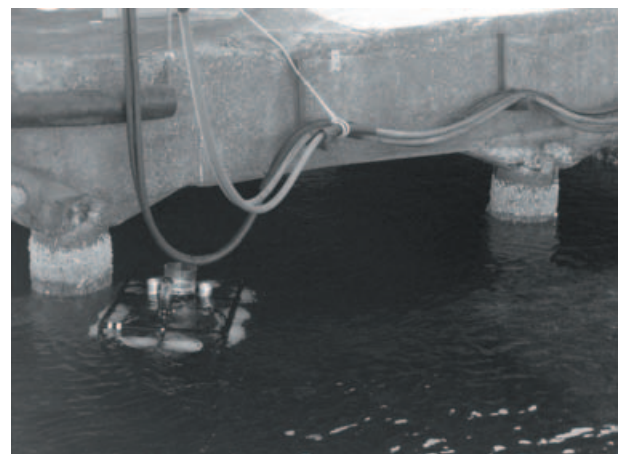
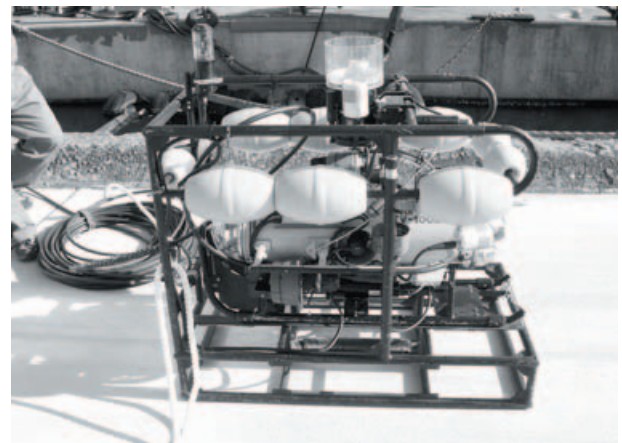
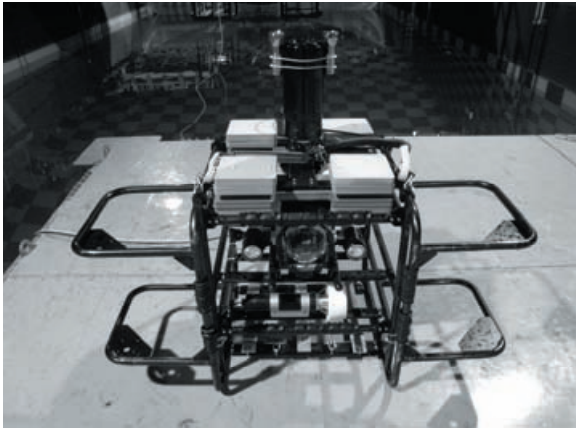
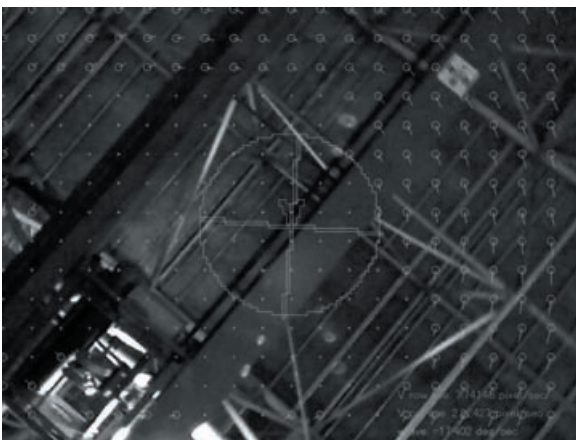


Fig.2.7 An approach of usage of ROV (Yokohama Port).

そこで港湾空港技術研究所では、ROV 自身が取得する床版下の連続画像から自身の運動状態を逐次推定する操作支援技術の研究開発を進めている (Fig.2.8)。ここでは取得した画像を細かくセクション化してそれぞれのオプティカルフローを算出し、それらの組み合わせからピークルの並進運動と旋回運動の逐次推定を図るものであり、水槽試験では良好な運動推定結果が得られている。また、その推定結果は Fig.2.9 に示すようにオペレータが直感的に把握できる形で提示される⁶⁾。



a) ROV for tank test model



b) Optical flows of each section

Fig. 2.8 ROV with teleoperation assistance by motion estimation based on optical flows (50kg).

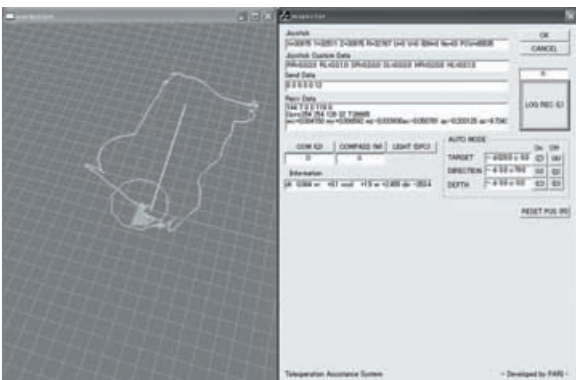


Fig. 2.9 The result of motion estimation of the ROV.

2.3.4 浸食海岸の汀線測量作業

海浜で実施される汀線測量作業は、縦断測量作業と横断測量作業に大別され、主に横断測量で得られた海岸の横断面から海浜の砂量の推定や、海岸浸食の推移を観測している。

測量は主にレベル測量で実施され、水準儀（水準器のついた望遠鏡，レベルともいう）と標尺（スタッフ）との間の比高を計測することで地形を計測する。

なお、標尺はスタッフマンによって陸上から砕波帯、ひいては水深1m程度の水中部まで持ち込まれて測量点の砂上に設置される（Fig.2.10）。このことから、その設置状況は測量結果に直結するが、とりわけ水中部においては標尺の安定した設置は容易でない。そこで筆者は、このような汀線測量作業に対して、陸上部から砕波帯、水中部までを同一の方法で連続的に測量可能な自動汀線測量システムを開発した。

本件については第3章で詳述する。



Fig.2.10 A worker with staff who walk into surf zone (Niigata West Coast).

2.3.5 海洋浮体構造物の係留装置の点検作業

海洋浮体構造物である灯浮標の係留装置の点検作業は、浮体が敷設されている箇所へ潜水士が入り、所定箇所の寸法をノギス等で直接計測することでその磨耗量を把握している。ここでは特に Fig.2.11 に示すような係留装置が海底と接触している箇所について、鎖のコマ同士が接続している部分の寸法を計測している。

また、湾内の比較的小型の灯浮標などについては、Fig.2.12 に示すように台船上に陸揚げしてメンテナンスを行うこともある。

一方、国土交通省が整備を進めている大型海洋浮体構造物の GPS 波浪計も灯浮標と同様に索で海底に係留された構造物である。しかしながら、設置海域が沖合であることから潮流や波浪などの海象条件が厳しく、これらの係留装置の点検実績はない。

そこで筆者は、このような厳しい海象条件下において水中部無人で係留装置の残存寸法を計測するための係留装置点検システムの開発に着手した。

本件については第4章で詳述する。



Fig.2.11 Measurement of mooring facility of lighted buoy (Tokyo Bay).



Fig.2.12 Lighted buoys raised on salvage barges (Tokyo Bay).

2.4 水中作業の無人化に向けた提案

これまでに列挙した水中作業の事例において、これらの作業を困難にしている主たる要因として、海域の透明度の低下、狭隘な空間、厳しい海象条件など、いずれも人間にとって厳しく劣悪な作業環境が挙げられる。ここで、2.1節で採り上げた水中作業の事例のうちから、「(4)浸食海岸の汀線測量作業」と、「(5)海洋浮体構造物の係留装置の点検作業」について、新たな手法を提案しその水中部で実施される作業の無人化を図ったので第3章と第4章でそれぞれ詳細に記述する。

ここでは、「(4)浸食海岸の汀線測量作業」の無人化手法は走行型、「(5)海洋浮体構造物の係留装置の点検作業」の無人化手法は遊泳型で実現することとした。次に移動方式に関する知見を示す。

2.4.1 走行型ロボット

(1) 走行型ロボットの分類

陸上および海底面上の両方で移動可能な移動方式には、車輪式、クローラ式、アルキメデススクリー方式、歩行式などが挙げられる。

車輪式は整地上であれば簡単な構造で高い移動速度を実現できることから広く一般的に用いられている反面、特殊な機構を持たない通常車輪のみで乗り越えられる段差高は車輪直径の1/3程度であり、凹凸への適応性はあまり高くない。クローラ式は車輪式と比べて凹凸や軟弱な地盤などの不正地への適応性が高く、建設機械などに多く用いられている。自重の増加や軟弱地盤への対応は接地圧を下げる手法が一般的であり、クローラ幅の広い湿地用の建設機械などが多数存在する。アルキメデススクリー方式は軟弱地盤や氷上での走行に適しており、摩擦の大きな走行面での使用には適していない。連続的に走行面へ接するこれらの移動方式は、いずれも水中での底質の巻き上げは少なくなく、また轍などの走行面への浸食も少なくない。

一方、歩行式は機構や制御が複雑で走行速度を向上しにくい反面、走行面との接地が離散的であることから走行面に与える影響は比較的小さく、水中では底質の巻き上げも少ない。また対応可能な段差高は主に脚上げおよび脚下げ高さなどの機構的境界によって決定されるとともに、その場での方向転換や胴体姿勢の制御などが可能である場合が多く、その運動の自由度は高い。

第3章で詳述する汀線測量ロボットの移動方式は、軟弱地盤への対応、走行面への浸食の低減、陸域から水中までを同一の手法で移動し測量する観点から、歩行式を採用した。次節では一般に高い安定余裕を有する4脚以上の歩行ロボットの研究開発事例を示す。

(2) 4脚以上の歩行ロボットの研究開発の事例

4脚歩行ロボットとしては東京工業大学の TITAN シリーズが知られており、各研究段階で様々な提案がなされている。例えば普及型の研究プラットフォームとして市販されている TITAN VIII⁷⁾やウインチとの組み合わせで急傾斜地での法面作業を目指した TITAN XI⁸⁾などがある。また、米国 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)の支援を受けてボストンダイナミクス社が開発した Big Dog は脚機構のコンプライアンスを利用して外乱や不正地に積極的に対応した歩行ロボットの一つである⁹⁾。

6脚歩行ロボットには米国オハイオ州立大学の OSU Hexapod¹⁰⁾や Adaptive Suspension Vehicle (ASV)¹¹⁾、地雷探査を目指した千葉大学の COMET-IV などがあり、ASV や COMET-IV はエンジンと油圧機構を動力としている。また水中歩行型としては捨石マウンドの出来形調査を目指した港湾技術研究所（現港湾空港技術研究所）のアクアロボシリーズがあり、アクアロボ 2 号機では海洋工事現場での調査試験が実施された⁵⁾。

8脚歩行ロボットとしてはカーネギーメロン大学の火山探査用ロボット Dante シリーズが南極大陸のエレバス火山などで歩行実験を行った事例がある¹²⁾。また水中歩行型としては五洋建設株式会社の浚渫ロボットふたばシリーズ¹³⁾ や捨石均し機 SEADOM¹⁴⁾がある。これらは直動型の脚機構を有する大型の水中歩行ロボットであり、それぞれ実際の海洋工事での使用実績がある。

(3) 提案手法の形式

以上のように、4脚以上の歩行ロボットは当初より屋外での稼働を前提とした研究開発事例が多く、種々の作業を目的としている。しかしながら、軟弱な海浜の陸上部と水中部の両方での運用を想定した水陸両用型の歩行ロボットの研究開発事例は非常に少ない。また、汀線測量作業においては、砕波帯や水中部の測量時であっても測量器部を常に空中で安定保持しなければならないことから、歩行機構を利用して測量器部を安定保持しながら汀線測量作業を実現する歩行ロボットの研究開発を実施することとした。

2.4.2 遊泳型ロボット

(1) 遊泳型水中ロボットの分類

遊泳型の水中ロボットはスラストやポンプ、ヒレなどの推進機構の別はあるものの、大別すれば有索式と無索式に分類可能である。多くの場合、有索式は遠隔操作型であり、ROV (Remotely Operated Vehicle) とよばれる。一方、無索式は UAV (Unmanned Untethered Vehicle) とよばれ、自律型のものを特に AUV (Autonomous

Underwater Vehicle) とよぶ。

空中や母船上から動力を供給され遠隔操作で操縦される ROV は海底油田の開発にともなって発展し、TV カメラだけを装備した小型のものから重作業を行う大型のものまで様々である。一方、AUV はその内部に動力源と高い自律機能を具備する必要があることから、そのエネルギー技術と自動航行技術の進展がその発展のキーとなっている。

第4章で詳述する波浪計の係留装置点検システムの形式には、自身が取得する水中映像を利用してオペレータの遠隔操作を補助する自律機能を持たせた水中ビークルとした。すなわち、有索でありながら AUV 的な側面を持った半自律型水中ビークルである。次項では AUV の研究開発事例を示す。

(2) AUV の研究開発の事例

AUV の研究開発は比較的ミッションが単純な中層域の水質調査や海底地形の調査から進展し、米国ウッズホール海洋研究所の ABE (Autonomous Benthic Explorer) はいち早く実用域に達した AUV の一つといえる¹⁵⁾。また、東京大学生産技術研究所と三井造船株式会社が共同開発したアールワン・ロボット¹⁶⁾は伊東市沖の手石海丘の全自動観測に成功し、その後継機となる r2D4¹⁷⁾も深海底観測に成果を挙げている。さらに、KDDI 研究所が開発したアクアエクスプローラー 2 は海底ケーブルの調査に実績を挙げている¹⁸⁾。

なお、カメラからの映像や画像を基に判断を行う AUV の研究開発の実績はまだ少なく、東京大学生産技術研究所のテストベッドロボットであるツインバーガー¹⁹⁾やその発展形であるトライドッグ 1 号²⁰⁾、滋賀県琵琶湖研究所（現滋賀県琵琶湖環境科学研究センター）の淡探²¹⁾はその数少ない事例である。

(3) 提案手法の形式

一般的に、AUV は単調なミッションを広範にわたって効率的に実施する用途に適しており、現段階では高次な判断やその場での柔軟な判断が求められるミッションの実現は容易ではない。よって、後者のようなミッションではいまだ人間が密に介在するシステムが必要とされる場所であるが、オペレータにとっては即応性が要求される操作や煩雑な操作は得意ではない。例えば、外乱中での水中ビークルの安定保持や目標物の追尾などは、オペレータにとっては困難な操作の代表といえる。すなわち、高次な判断に基づくオペレータの柔軟な遠隔操作を補助することを目的として、比較的低次ではあるがオペレータにとっては煩雑で即応性が要求される水中ビークルの運動制御の一部を自律化することは、水中での高度

なミッションを安全かつ確実に実現するための一手段として有効であると考えられる。

よって提案手法では、オペレータの遠隔操作の補助を目的として、カメラからの映像や画像を利用した光学誘導により目標物の捕捉と自動追尾を実現する自律機能を実現することを旨とし、遠隔操作と自律制御の複合操作・制御系を有する半自律型の有索式遊泳型水中ビークルの研究開発を実施することとした。なお、前述のように、カメラからの映像や画像を基に自身の行動の決定を行う AUV の研究開発事例は数少なく、オペレータの遠隔操作の補助を目的としてこれらの自律機能を実現する水中ビークルも皆無である。

3. 海岸整備にかかる水中作業の無人化手法の開発 ー浸食海岸の汀線測量作業ー

北陸地方整備局管内における直轄海岸として新潟海岸、下新川海岸、石川海岸が挙げられる。これらの海岸線は流入する大小の河川が運ぶ土砂によって形成されてきたものであるが、いずれの海岸も近年において激しく浸食されているのが現状であり、国自らがその管理を行うこととしている。

例えば新潟海岸は、これまで信濃川などから運ばれてきた大量の土砂によって海岸線を前進させ、新潟砂丘などを形成してきた。しかしながら近年では、治水事業の進捗にともなう土砂補給の減少に加えて地盤沈下の影響も相まってその性質は堆積性の海岸から浸食性の海岸へと移行し、一部の分水路の河口に海岸線の前進が見られるものの、昭和 22 年以降最大で 350～360m もの海岸線の後退が確認されている。またこの背後地には、海岸線近くまで新潟市郊外の住宅地開発が進んできており、その周辺に暮らす人々の生命や財産を守るためにも海岸の浸食対策は急務となっている。そこでこのような直轄海岸においては、海岸堤防の補強や緩傾斜堤、離岸堤の施工などを実施して海岸線の浸食と波浪による被害を防ぐと同時に、国自らが海岸技術調査としてその周辺環境調査とともに海岸浸食の現状とその推移を定期的に観測している。

北陸地方整備局が実施した新潟海岸（西海岸地区）での海岸技術調査の内容は大別すると、①汀線測量作業、②深淺測量作業、③環境調査、④航空写真撮影であった。以下にその調査の概要を示す。

①汀線測量

海岸の汀線部について、測線間隔 25m で縦断測量と横断測量（陸上）をそれぞれ年 2 回（6 月および 10 月）行

う。

②深淺測量

測線間隔 25m で汀線から離岸堤防法部までの範囲について、水深測量をトランシットと測深器によって年 2 回（6 月および 10 月）を行い、それをもとに水容積計算を行う。また、年 1 回（春季）環境調査に合わせて調査地点の海上測量を行う。

③環境調査

水質調査、底質調査、動植物プランクトン調査、底生生物調査を年 2 回（春季および夏季）を行い、付着生物調査、付着生物・魚類蛸集調査を年 1 回（春季）行う。

④航空写真撮影

垂直写真（連続）および斜め写真の撮影を年 2 回（6 月および 11 月）行う。

これらのうち測量作業については、水深が十分深い海域については音響測深器を利用した船舶による深淺測量が実施されている。一方、ごく浅い海域や波打ち際には音響機器や船舶自体の運用が困難であることから、干出した陸上部と合わせて踏査による人力の汀線測量が実施されている。言い換えると、水中から干出部にまたがる水陸境界域においては人力による汀線測量に代わる測量手法がなく、いまだ人に頼らざるを得ないのが現状である。

ここでは現行の人力による汀線測量を代替する自動汀線測量システムについて述べる。

3.1 新潟西海岸における汀線測量作業

3.1.1 現状の人力測量手法

新潟海岸で定期的実施されている汀線測量作業は、縦断測量作業と横断測量作業に大別され、縦断測量を実施の後、横断測量を実施するものである。

縦断測量は海岸線に並行な方向に実施する測量作業である。ここではまず、近傍の測量基準点を利用して海岸線と並行する方向に一本の測線を設定する。そして、その測線上を 20m 間隔でレベル測量を実施し、その各測量点を横断測量の測線の起点とするものである。

一方、横断測量は縦断測量の測線に直交し、海岸線を横断する方向に実施する測量作業である。すなわち、横断測量の測線は縦断測量で定めた各起点から縦断測量の測線に直交して海岸線を横断するように設定する。そして、その測線上を 5m 間隔でレベル測量を実施する。

以上の汀線測量作業により、20m 間隔で海岸の横断面が得られることとなり、これを利用して砂量の推定や海岸浸食の推移を把握しようとするものである。すなわち、一人の作業員（スタッフマン）が測量点に標尺をもって

移動し、別の作業員が水平に設置した水準儀の望遠鏡を通してそのメモリを読み取ることで、水準儀からの標尺位置の比高が計測できるものである。

なお、標尺はスタッフマンによって陸上から砕波帯、ひいては水深 1m 程度の水中部まで持ち込まれて測量点の砂上に設置される (Fig.3.1)。このことから、その設置状況は測量結果に直結するが、とりわけ水中部においては標尺の安定した設置は容易でない。標尺のメモリ自体は mm オーダーで読むことが可能であるが、測量結果への影響は不可避であり、従来手法から代替可能な測量手法の登場が期待されている。また、作業の安全性向上の観点からも、他の測量手法への代替が期待されている。



a) Leveling of the beach



b) Staff-man

Fig.3.1 Regular shoreline survey work in Niigata West Coast (Cross-sectional leveling).

3.1.2 提案する測量手法

測量用の標尺を携えて歩き回るスタッフマンに代わって、陸上部から水中部にわたり測量用のプリズムポールを安定保持しながら歩き回って測量を行う自律型測量ロ

ボットの導入を提案する²²⁾。これにより、本システムは従前のスタッフマンと比較して海象条件に左右されにくく、人力よりもやや深い領域まで測量が可能となる。

ここで測量ロボットの移動形式は、地盤に対して連続的に接する車輪型やクローラー型ではなく、離散的に接する歩行型を選択した。歩行型の特徴は、自重を安定して支えるだけの必要十分な接地圧の確保は必要であるが、地盤との接地自体は離散的であることからこね返しによる不整地での走破性の低下をほとんど考慮する必要はなく、また轍のように地形に対して連続的に大きなダメージを与えることもないことである。これらの特徴は地形測量を目的する本用途を鑑みれば最適と考えられる。

本システムは主に、前述のスタッフマンに代わってプリズムポールを安定保持して自律的に移動する「測量ロボット」のほか、「自動追尾型トータルステーション」、「ホスト PC」で構成される (Fig.3.2)^{23, 24)}。「測量ロボット」はあらかじめ指示された測量経路上を水中部から干出部にわたって連続的かつ自律的に移動し、「自動追尾型トータルステーション」によってその胴体位置 (高さ、位置) を計測するものである。ここで述べる「自律」とは、全体の作業計画は人が行うが、脚の動きや微地形への対応はロボット自身が行うものである。また、「測量ロボット」と「ホスト PC」は無線 LAN で接続され、「自動追尾型トータルステーション」と「ホスト PC」はシリアル接続されていることから、「測量ロボット」は「自動追尾型トータルステーション」で計測される自身の胴体位置の情報を「ホスト PC」を介して得ることが可能であり、微地形に対応した足の高さ情報と組み合わせてより詳細な地形情報を得るものである。

3.2 測量ロボットのハードウェア

3.2.1 防水モジュール構造の採用

測量ロボット部は 1 脚あたり 3 つの回転関節を有する脚部を 6 脚有する歩行ロボットである。このロボット部では防水構造を採る部位を限定し、モジュール化された 1 個の胴体部と 18 個の関節ユニットのみがそれぞれ独立に防水構造を採り、互いに水中コネクターで接続することとした。また、ロボットの脚部は胴体部に直接固定せず、胴体から独立したフレームに固定した。結果として胴体部は、脚からの反力に対応する構造的強度をほとんど必要せず、ほぼ防水性能だけを考慮して設計すれば良いこととなり、胴体部の重量低減に寄与している^{25, 26)}。

また、関節ユニット単体あるいはロボットの脚部と胴体部は容易に分離可能であり、モジュール単位での容易な部品交換を実現することで、メンテナンス性の向上に

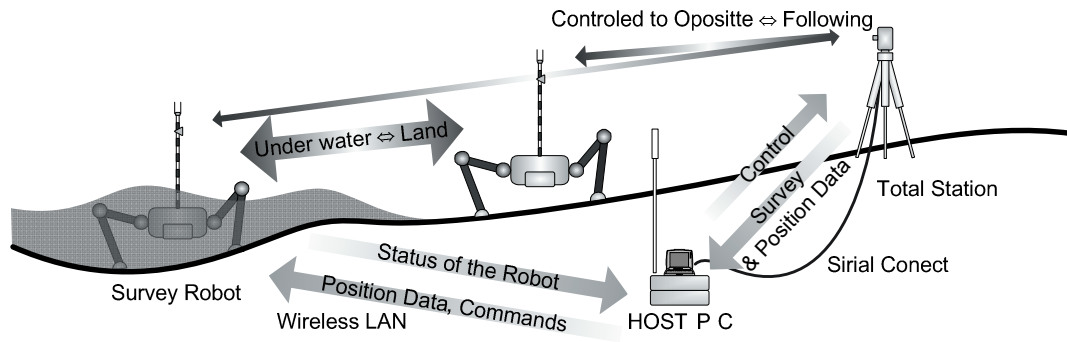


Fig.3.2 Image of an automated shoreline survey system.

貢献している (Fig.3.3). Table 3.1 に測量ロボット部である水陸両用型歩行ロボットの主な諸元を示す.

Table 3.1 Specification of the robot part.

Leg length	0.500m (lower tight)
Body diameter	0.308m
Mass	95.0kg
Pressure	0.3MPa (FS 1.5)
Battery	NiMH 28.8V×8Ah
Operating time	0.8h

なお、ここでは外圧の絶対値と容器の大きさがともに小さいことから、耐圧設計については有限要素法等の厳密な構造計算は行っていない。胴体の円筒部については弾性座屈を、蓋部については中心部の引張強度をそれぞれ強度上の上限とし、安全率をかけて簡易に設計した。また、動力源としてNiMHバッテリーを適用したことから、ガス発生による胴体内圧の異常上昇を防止する安全弁を設けた。

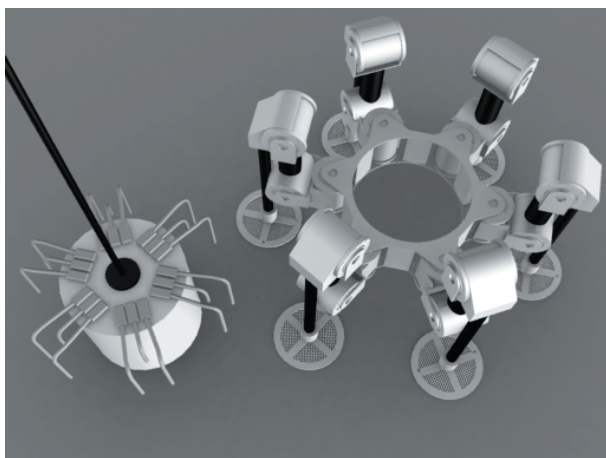


Fig.3.3 Removable body part.

3.2.2 地盤支持力に応じた足部の設計

砂浜上での確実な移動を実現するためには、その特性を把握しておく必要がある。ここではまず、地盤支持力について現位置コーン試験を実施した (Fig.3.4)^{25, 27}。

現位置コーン試験とは、土質サンプル等を持ち帰ることなく、現場で直接、地耐力の目安となるコーン指数を計測する試験である。ここではポータブルコーンペネトrometerを速度 1cm/sec で土中に貫入させた際の貫入抵抗を計測するポータブルコーン貫入試験を実施した。



a) land part



b) Surf zone

Fig.3.4 In-site cone examination (Niigata West Coast).

ポータブルコーンペネトロメーターは、先端角度 30°、断面積 6.45cm² と 3.23cm² の 2 種類の円錐状の先端（コーン）を持ったロッドであり、その貫入抵抗を加重計で計測するものである。ここで求められるコーン指数とは、ポータブルコーンペネトロメータを土中に貫入させたときの抵抗力をコーンの断面積で除した値、すなわちコーン貫入抵抗でありその地盤の地耐力を表している。

2004 年 6 月、新潟西海岸の第 1 突堤近傍（養浜部）における原位置コーン試験を実施し、砂浜表層のコーン指数 CI の分布を得た (Fig.3.5)。その結果、その平均値は $CI_{ave}=7.56\text{kgf/cm}^2$ 、最小値は $CI_{min}=3.56\text{kgf/cm}^2$ であった。

ロボットの足部形状を円板とした場合、このコーン指数の最小値と自重との平衡条件から足部の最小直径を試算すると式(3.1)のようになる。

$$p = \frac{G}{N\pi \cdot D_{min}^2/4} = CI_{min}$$

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4G}{N\pi \cdot CI_{min}}} \approx 3.36[\text{cm}]$$

$$N = 3, G = 95.0[\text{kgf}],$$

$$CI_{min} = 3.56[\text{kgf/cm}^2]. \quad (3.1)$$

D_{min} ; Minimum diameter of foot circle [cm].

N ; Number of contactlegs.

G ; Weight of robot [kgf].

p ; Ground contact pressure [kgf/cm²].

仮にこのコーン指数の最小値と接地圧との平衡条件を設計条件とすると、コーン指数は 1.0cm/sec で沈下する際の貫入抵抗と等しいことから沈下の懸念があり十分とはいえない。

ところで、機械側の移動能力で示される走行性能をモビリティと呼び、地盤側の許容能力であるコーン指数で示される走行地耐力をトラフィカビリティという。このトラフィカビリティからその地盤上での車輛の可動性を判定するモビリティ予測法は WES 法と呼ばれ、車輪型や履帯型車輛の走行限界を地盤支持力に走行装置の形態や形状を加味して判定する方法である^{28~30)}。

具体的には、車輛の荷重に走行装置の形状因子を加味した地盤への実質的負荷と CI_{min} の平衡条件をその走行限界として判定するものである。ただし、WES 法における既存の走行装置の分類に歩行型がないことから、接地方法で類似する履帯型に準じて試算した。

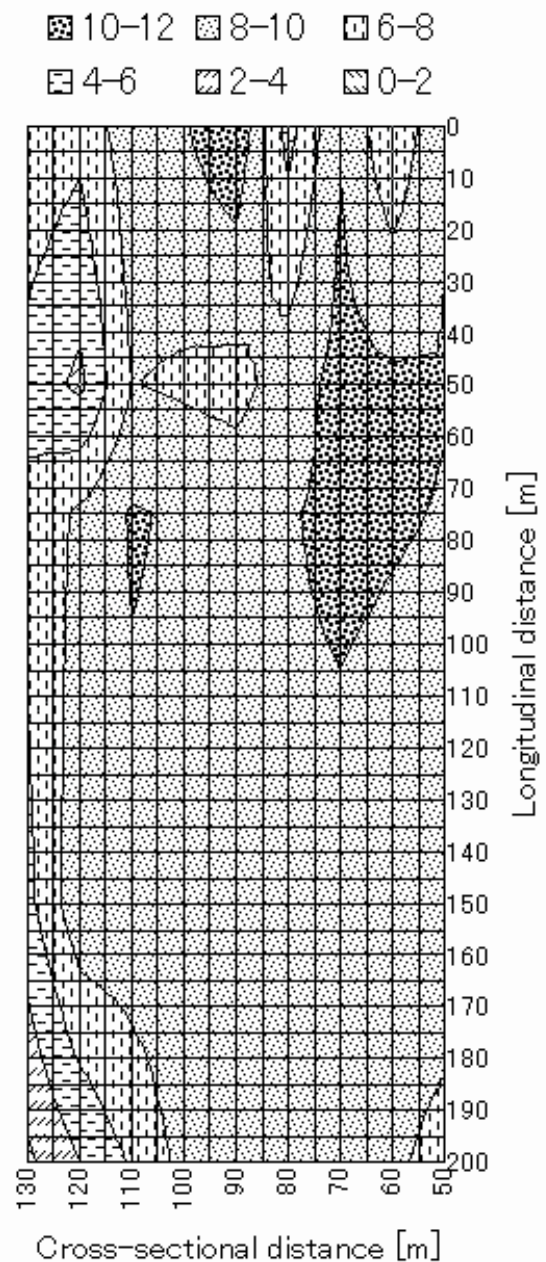


Fig.3.5 Distribution map of cone penetration resistances neighboring the 1st jetty of the Niigata West Coast (Depth: 10-20 cm).

次式に WES 簡易法を示す。ここで、車両指数 VCI (Vehicle Cone Index) は走行装置の形式や機体重量、形状などによって決定される接地圧に関係の深い値であり、この値が小さいほど軟弱地での走行能力が高い。下段の式は車両指数が小さな履帯型車両の VCI と接地圧の関係式であり、多くの車両指数を計算して得られた経験式である。

$$VCI = \frac{CI_{\min} + 0.0388}{0.071125}$$

$$VCI = 125p$$

(empirical equation)
in case of crawler type with lower VCI)
 VCI ; Vehicle cone index.

上式を利用して次式が導かれる。

$$CI_{\min} = 8.890625p - 0.0388$$

$$p = \frac{G}{N\pi \cdot D_{\min}^2 / 4}$$

よって、

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{35.5625G}{N\pi(CI_{\min} + 0.0388)}} \approx 9.98 [\text{cm}]$$

$$N = 3, G = 95.0 [\text{kgf}], CI_{\min} = 3.56 [\text{kgf/cm}^2].$$

となり、この結果から自重 95kgf の 3 脚支持ロボットが $CI_{\min}=3.56\text{kgf/cm}^2$ の地盤上を歩行するためには、直径 10.0cm 程度の円盤状の足部で十分であることが明らかとなった。この場合のロボットの接地総面積は 235.6cm^2 である。

さらに、ロボットの足部に外径 20.0cm、内径 16.0cm の辺縁部を設けた結果、接地面積は 574.9cm^2 となり、自重 95kgf で走行限界は $CI=1.20\text{kgf/cm}^2$ となることから、WES 法上では砂浜の最小コーン貫入抵抗 $CI_{\min}=3.56\text{kgf/cm}^2$ に対して 3 倍程度の余裕を持つこととなる。また、3 脚支持時における接地圧 p と砂浜の最小コーン貫入抵抗 $CI_{\min}=3.56\text{kgf/cm}^2$ を単純比較した場合、接地圧は $p=0.165\text{kgf/cm}^2$ となることから、接地圧 p は砂浜の最小コーン貫入抵抗 $CI_{\min}=3.56\text{kgf/cm}^2$ に対して 20 倍以上の余裕を持つこととなる。これは建設機械を原地盤上で利用する場合の判定基準と同等以上の余裕であることから、ロボットはこの地盤上で安全に運用できる。

$$\frac{CI_{\min}}{CI'} = \frac{3.56}{1.20} \approx 2.97$$

$$\frac{CI_{\min}}{p} = \frac{3.56}{0.165} \approx 21.6.$$

3.2.3 脚の可動範囲と傾斜への対応

ロボットの足の可動範囲は実験を実施する新潟西海岸の海浜の傾斜を考慮して決定した。その海浜の大域的な斜度は 2004 年の定期測量の結果から 1/25~1/30 程度と読みとれた。同様に、局所的な最大斜度は領域全体を通して 0.3 を越えることはなかった。そこで、ロボットの脚の可動範囲を Fig.3.6 のように設計した^{25,27)}。

なお、その脚の可動範囲である円筒形可動範囲は、各関節角度の可動範囲と隣接の円筒型可動範囲によって制限されている(制限稼働範囲; constrained working volume)。

3.2.4 防水型関節ユニット

ここで開発した防水型関節ユニットの特徴の一つは均圧構造を採用していないことであり、結果としてモーターやセンサ類など内部の構成要素に気中用の汎用品が利用可能となっている^{27,31)}。加えて、この回転可動部の密封には摩擦や変形が少ない硬質樹脂製シールを適用している。これは、①メカニカルシールと比較して構造が単純であり、軸方向寸法の小型化が可能、②減速後の密封であるため周速が遅い、という 2 つの理由によるが、それ単体では十分な密封性能を得ることは困難であるため、密封機構全体でその性能を補うこととした^{23,32)}。

一般的に、硬質樹脂製シールは微小な凹凸に倣いにくく、完全な密封性能を発揮させることは容易ではない。本用途では、このシールを回転可動部にラジアルシールとフェイスシールとして二重に配し、その間に空気や海水と比して高粘度の流体を充填するシール層を設けた。

また、樹脂性シールの選定にあたっては、砕波帯での密封性能を考慮して、バネで初期接触圧を増加するものを選定した。これは、水圧による接触圧が期待できない浅海域において、回転可動部が引き波を受けた際に発生する負圧に対応するためである。通常、シールの密封効果はその接触圧と密封流体の粘度によるところが大きいことから、負圧によってシールの接触圧が極端に小さくなると漏水のリスクが増大する。そこで、一定の初期接触圧を確保することで負圧による漏水のリスクを低減した。なお、接触圧の増加にともなうシールの磨耗量や摩擦力の増加については、耐磨耗性に優れかつ摩擦係数の小さなシール材料(ラジアルシール $\mu=0.11$ 、フェイスシール $\mu=0.09$)を選定することで対応した。

なお、ここで使用したモーターは停動トルク 1.02Nm を発する 60W のコアレス DC モーターであり、このトルクは多段の平歯車で減速された後、防水ハウジング内壁に設置された内歯歯車を介して外部に伝達される。最終減速後の関節ユニットの停動トルクは約 980Nm が見込まれ、起動電流は 39.3A にも及ぶ。ここでは歩行時の連

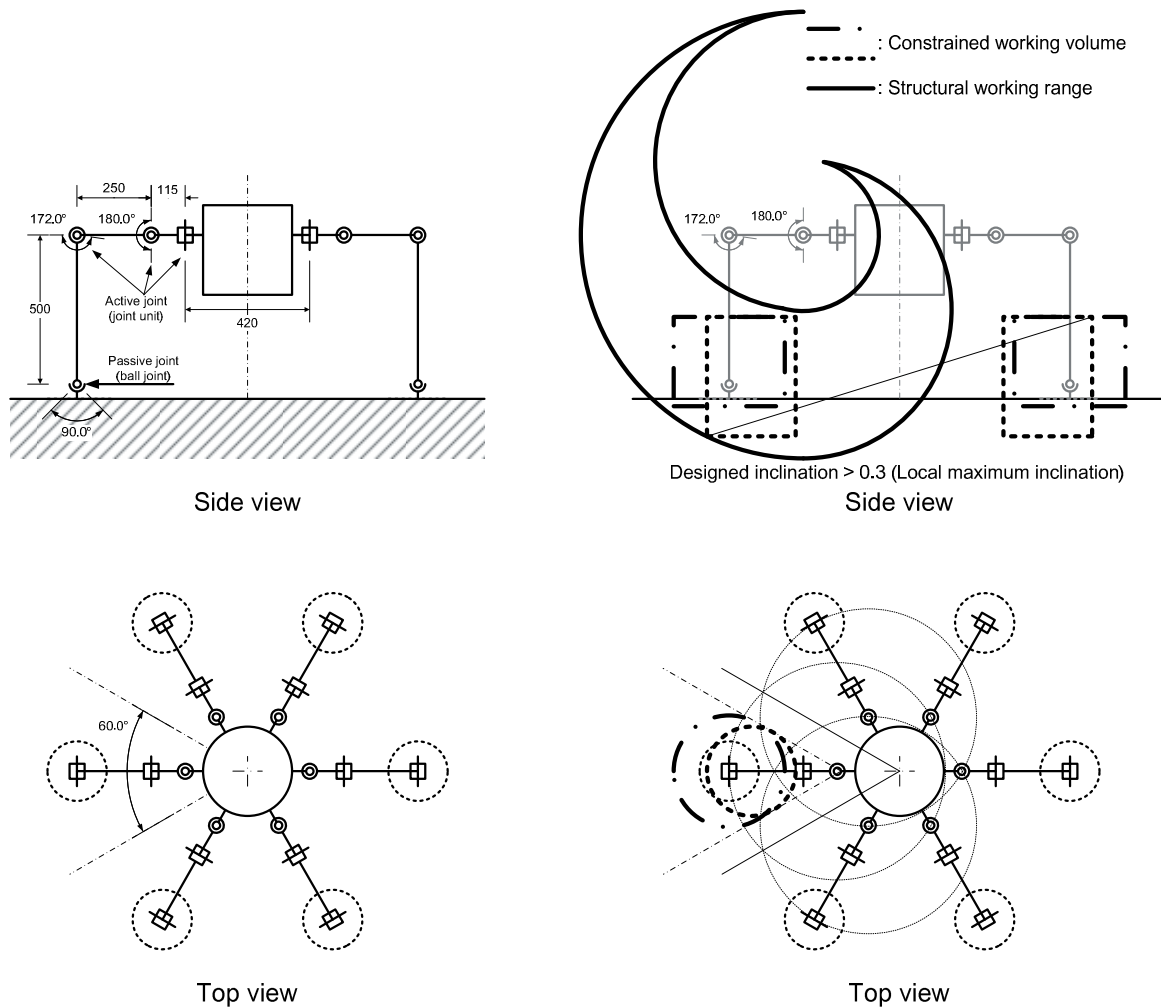


Fig.3.6 Constrained working volume (CWV).

続負荷によるモーターの焼損を防ぐために、その駆動電流を PWM の制限によって常にモーターが許容する最大連続電流 3.81A 以下に制限し、連続発生トルクを約 80Nm とした。

Table 3.2 に防水型関節ユニットの主要緒元を示し、Fig.3.7 から Fig.3.10 に防水型関節ユニットの外観と内部機構を示す。

Table 3.2 Specification of the watertight type joint unit.

Outside dimention	φ110mm×125mm
Mass	2.1kg
Output torque	Rating torque 82.9Nm (Continuous) (The current is limited to rated range)
Reduction ratio	Joint part 1/961.5375, Potentiometer 1/288.46125
Motor	Maxon RE30, Power 60W Rated torque 0.0862Nm (Continuous) Starting torque 1.02Nm Rated current 3.81A (Continuous) Starting current 39.3A

18 個の関節ユニットのモーターコントローラーおよびモータードライバーは、関節ユニット内ではなく全てロボットの胴体内に設置され、水中コネクターを介して接続されている。胴体内の制御用 PC と USB 接続されたモーターコントローラーは次式に基づいて関節ユニットの関節角度の位置制御を行う。

$$o = \frac{K_p}{K_{Pz}} (x_d - x) + \frac{K_D}{K_{Dz}} (\dot{x}_d - \dot{x}) + \frac{K_I}{K_{Iz}} \int_0^t (x_d - x) dt \quad (3.5)$$

t : Time
 o : Control output
 x_d : Desire position
 x : Present position

$\frac{K_p}{K_{Pz}}$: Proprtional gain
 $\frac{K_D}{K_{Dz}}$: Deviati gain
 $\frac{K_I}{K_{Iz}}$: Integral gain.

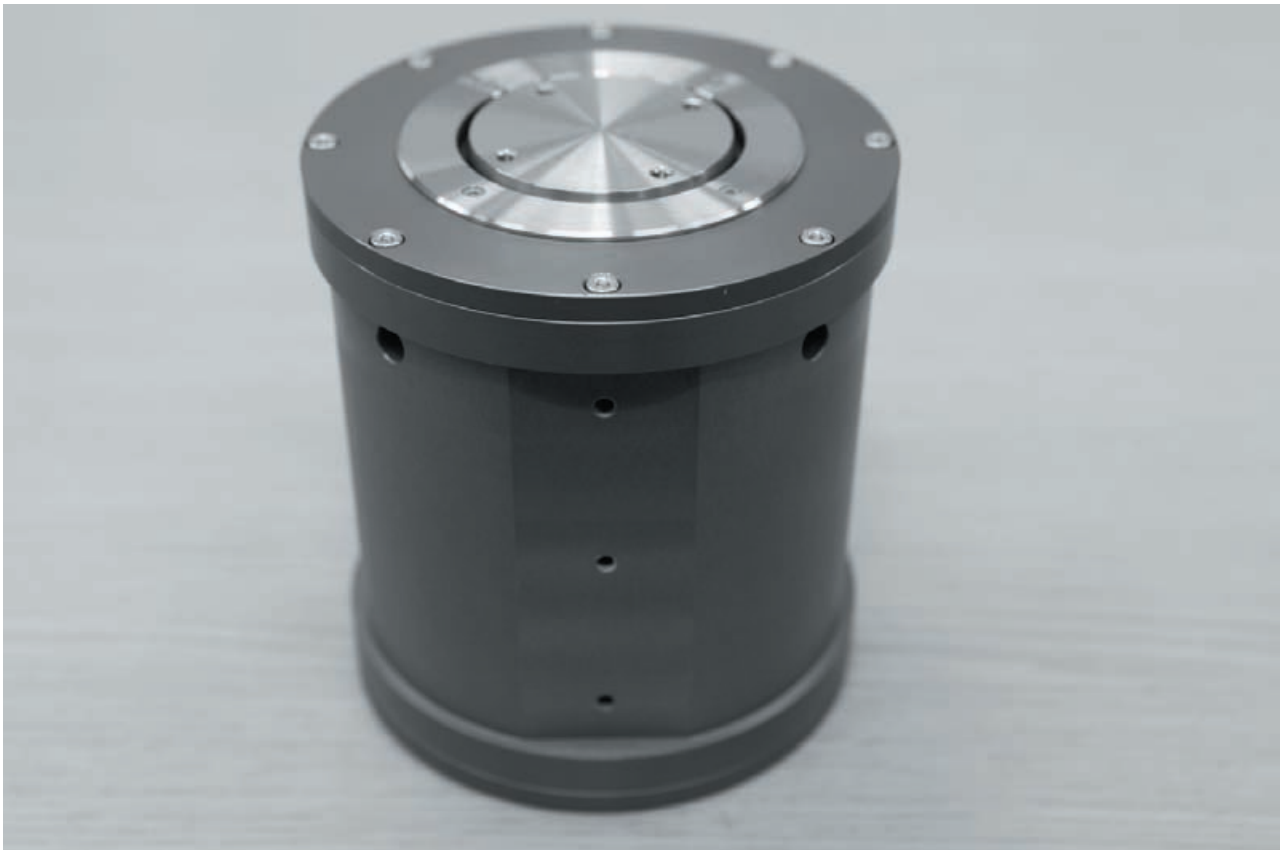


Fig.3.7 Appearance of the watertight type joint unit.

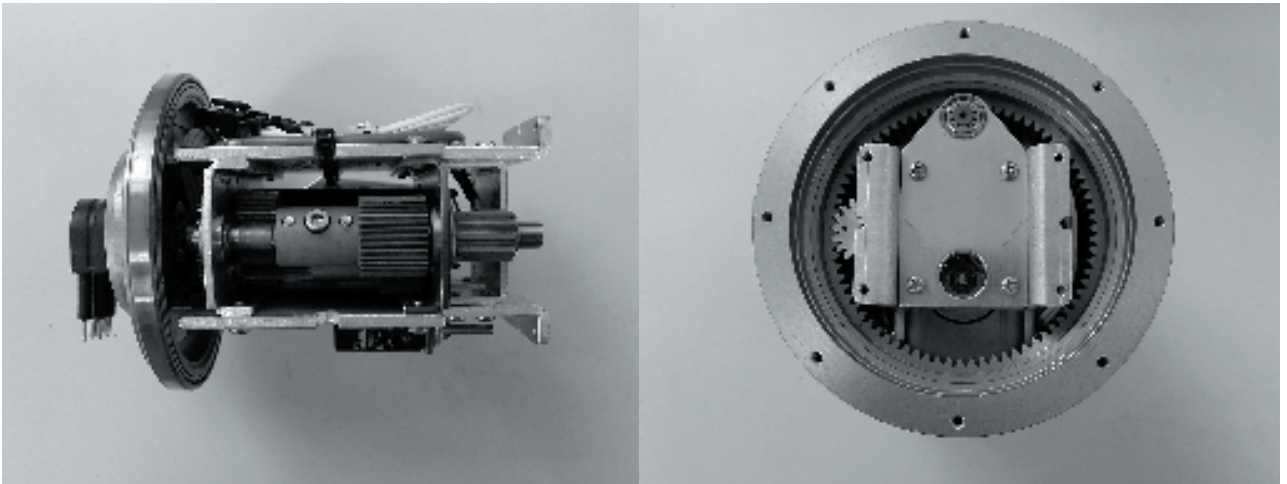


Fig.3.8 Internal mechanism of the watertight type joint unit.

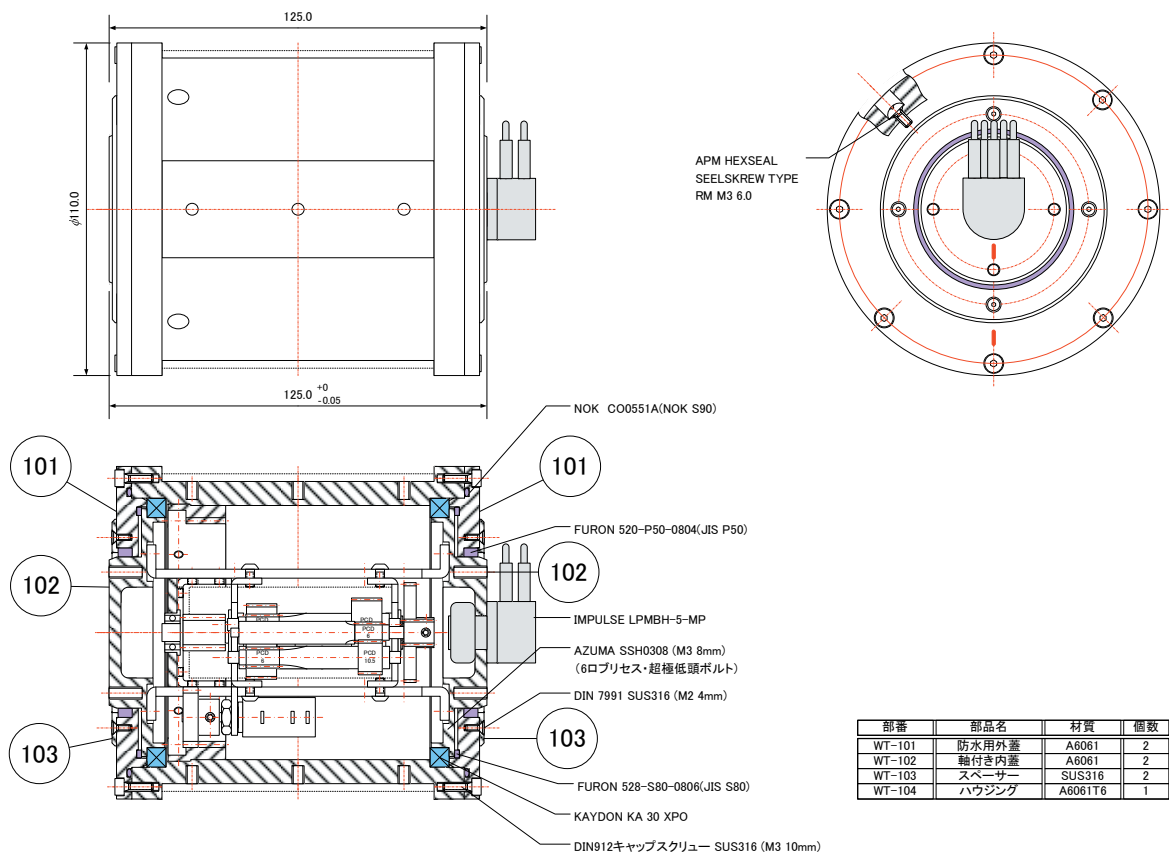


Fig.3.9 Assembly diagram of the watertight type joint unit

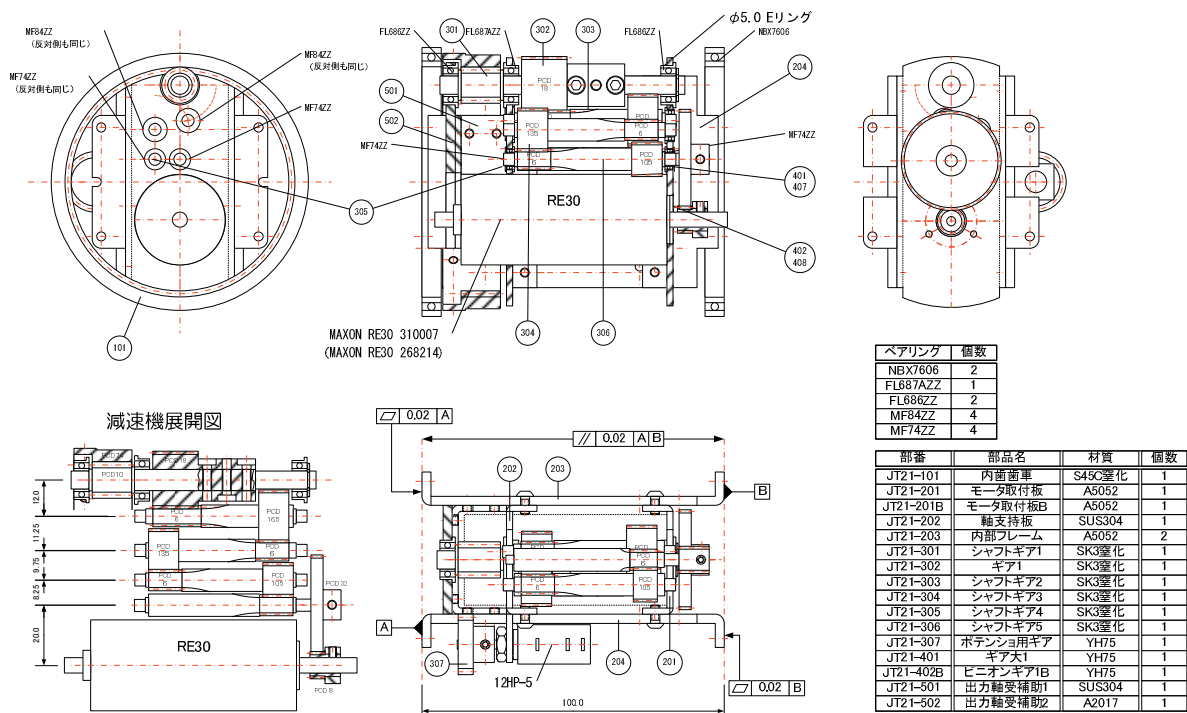


Fig.3.10 Diagram of internal mechanism of the watertight type joint unit

関節ユニットの関節角度はユニット内のポテンシオメータで取得し、その値はアナログ電圧値のまま前述の水中共用コネクタを介して胴体内部のコントローラに伝達される。この際、ポテンシオメータからの信号ラインにローパスフィルターを挿入することでPWM駆動に起因するノイズによる振動や誤動作の低減を図った。なお、ここでのフィルターは電源を要しない簡易なRCパッシブフィルターとした (Fig.3.11)。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.6)$$

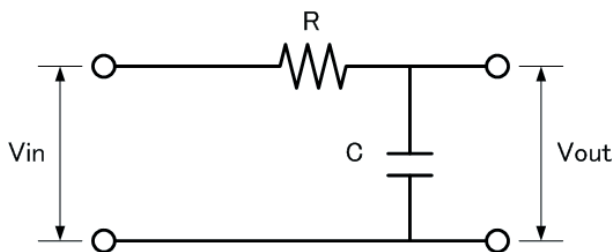


Fig.3.11 Pattern diagram of RC passive filter.

前述の趣旨からローパスフィルターの遮断周波数はPWM周波数以下に設定する必要があるが、関節の動作を大きく妨げるほどの低い周波数に設定することはできない。ここでは $R=470\Omega$, $C=0.33\text{mF}$ として、遮断周波数を $f_c=1.026\text{kHz}$ と設定した。

3.2.5 動力源

ここで構築する自動測量システムによる無索・自動での稼働および検証実験を実施するためには動力源の搭載が必須であり、動力源としてロボットの胴体内にバッテリーを搭載した。主要な二次電池のエネルギー密度は Li-Ion 150Wh/kg, NiMH 80Wh/kg, NiCd 60Wh/kg, Pb 40Wh/kg 程度であるが、ここでは組電池として入手しやすい NiMH 電池を採用した (Table 3.3)。なお、この NiMH 電池を用いた場合の実験装置の稼働時間は約 40 分である。

Table 3.3 Specification of the equipped battery.

Cell type	NiMH
Voltage	28.8V
Capacity	8Ah
Composition	1.2V 8Ah×24 (Seriesconnected)
Dimension and mass	200×200×80mm / 3.5kg

3.2.6 接地センサ

ロボットの足部の地面との接地と遊離状態を感知するために力センサを足首に設置した。ここでは最大 4.9kN

の大きな測定レンジを有し、センサ単体で IP68 相当の防水性能を有している 3 分力計測型の Kistler 社製アンプ内蔵力センサ 9602A を採用した (Fig.3.12)。

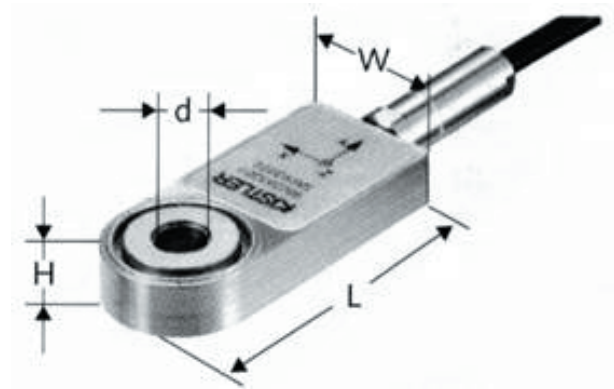


Fig.3.12 Amplifier-embedded 3. axes force sensor
(Kistler 9602; 57mm L×25mm W×10mm H, Mass 30g,
<http://www.kistler.co.jp>).

3.2.7 測量機能の導入

水陸両用型歩行ロボットに測量機能を持たせるために、その位置を安定して計測し測量に活用するための機能が必要であり、その測位・測量機能の統合をもって自動測量システムとなる。

ここでは水中でもその測位が求められることから、ロボットの頭上に高さ 1450mm のプリズムポールを取り付け、その最上部に設置したプリズムミラーをトータルステーションで常時自動で追尾をすることとした。トータルステーションで計測された位置情報は無線 LAN を介して水陸両用型歩行ロボットへフィードバックされロボットの誘導にも利用可能である。以上の方法で、水陸両用型歩行ロボットと測位・測量機能を統合し、安定して測位・測量可能な自動測量システムとして構築した。

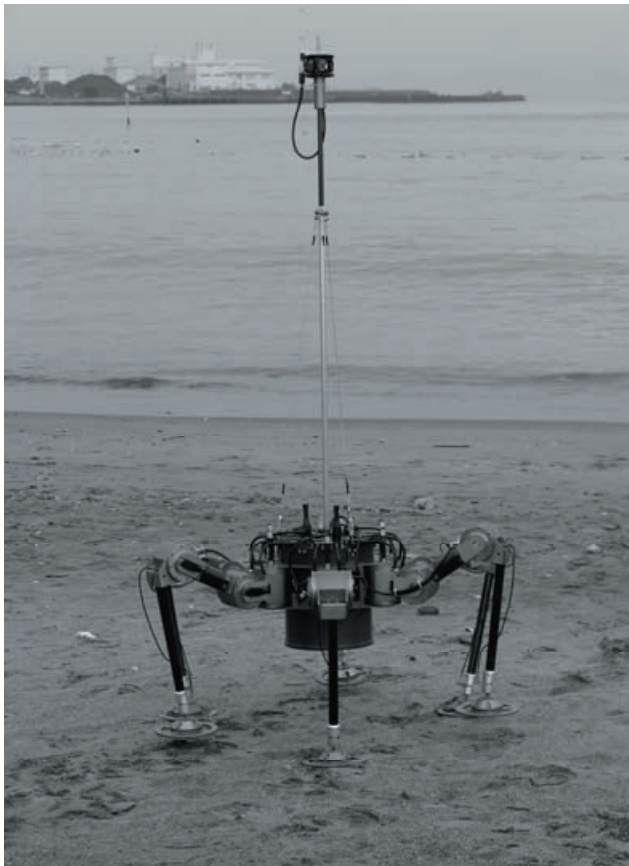
Fig.3.13 に測量ロボットの概観を示す。

3.3 測量ロボットのソフトウェア

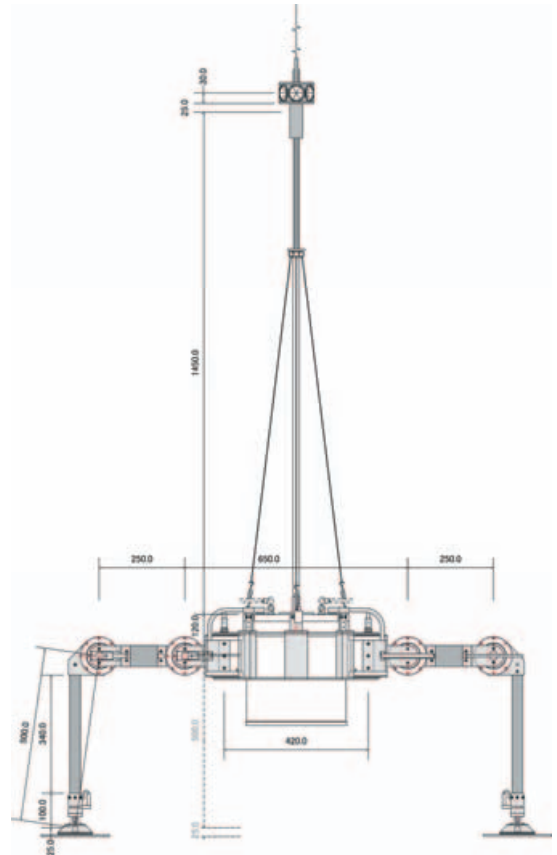
3.3.1 ロボットの運動の表現

与えられた移動経路に対し、どのような形式でロボットの運動指令を与えるかは重要である。本節では、歩行アルゴリズムへの運動指令の入力方法を述べる。

ロボットの運動する環境に固定された 3 次元のデカルト座標系を考える (Fig.3.14)。これを世界座標系とし、 W の添字をつける。 Z_W 軸は鉛直下向きとする。さらに、ロボットの胴体中心に固定された胴体座標系とし、 B の添字をつける。 Z_B 軸は鉛直下向きとする。変数の左肩添字はその変数の表される座標系を示す。



a) Appearance of the survey robot



b) Dimension of the major parts.

Fig.3.13 Survey robot part (95kg).

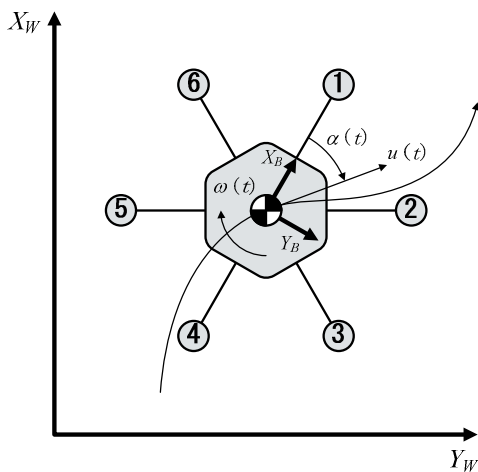


Fig.3.14 Coordinate system and motor command of the robot.

剛体の運動は、並進及び回転のそれぞれの成分から構成される。ロボットの並進運動は、世界座標系における位置 ${}^W \mathbf{p}(t)$ であり、時間の関数である。

$${}^W \mathbf{p}(t) = (p_x(t), p_y(t), p_z(t))^T. \quad (3.7)$$

ロボットの回転運動は世界座標系における姿勢 ${}^W \boldsymbol{\gamma}(t)$ ，すなわち、ロール角 γ_x ，ピッチ角 γ_y ，ヨー角 γ_z であり、これらも時間の関数である。

$${}^W \boldsymbol{\gamma}(t) = (\gamma_x(t), \gamma_y(t), \gamma_z(t))^T. \quad (3.8)$$

位置と姿勢の導関数は次のようになる。

$${}^W \mathbf{v}(t) \equiv (v_x(t), v_y(t), v_z(t))^T \equiv \frac{d{}^W \mathbf{p}(t)}{dt}. \quad (3.9)$$

$${}^W \boldsymbol{\omega}(t) \equiv (\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t))^T \equiv \frac{d{}^W \boldsymbol{\gamma}(t)}{dt}. \quad (3.10)$$

3.3.2 2次元空間の運動

本研究では、操作者がロボットに与える運動指令は2次元平面上の動きに制限する。また、胴体高さ $p_z(t)$ は地面から一定に、ロール角とピッチ角は0に保たれるように制御されるものとする。したがって、前節の運動指令は、

$${}^w \mathbf{p}(t) = (p_x(t), p_y(t), p_z(0))^T \quad (3.11)$$

$${}^w \boldsymbol{\gamma}(t) = (0, 0, \gamma_z(t))^T \quad (3.12)$$

となり，ロボットの運動は2次元上と等価になる．これら3つのパラメータは，2次元平面上での運動を完全に記述するものである．また，これらの導関数は，

$${}^w \mathbf{v}(t) = (v_x(t), v_y(t), 0)^T \quad (3.13)$$

$${}^w \boldsymbol{\omega}(t) = (0, 0, \omega_z(t))^T \quad (3.14)$$

となる．

並進運動の方向 $\theta(t)$ は以下のように定義される．

$$\theta(t) \equiv \tan^{-1} \frac{v_y(t)}{v_x(t)}. \quad (3.15)$$

測量ロボットは全方向運動 (omnidirection) が可能であるので， $\theta(t)$ は胴体の姿勢 $\gamma_z(t)$ と必ずしも等しいわけではない．したがって，ロボットの胴体方向と進行方向のなす角は側行角 (crab angle) $\alpha(t)$ として次式のように定義される (Fig.3.14)．

$$\alpha(t) \equiv \theta(t) - \gamma_z(t). \quad (3.16)$$

2次元平面上でのロボットの運動を記述するにあたり，Naval Postgraduate School の自律移動ロボット Yamabico-11 プロジェクトで開発された MML(Model-based Mobile robot Language)を適用する³³⁾．これは港湾技術研究所の6脚歩行ロボットアクアロボ1号機にも適用した実績がある．MML ではロボットの運動は $(u(t), \kappa(t), \omega_z(t))$ で記述される．ここで， $u(t)$ は胴体の並進速度， $\kappa(t)$ は胴体運動の軌道， $\omega_z(t)$ は胴体の回転速度である．この MML による運動の記述は，以下のように変換することができる．

$${}^B \mathbf{v}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \cos \alpha(t) \\ u(t) \sin \alpha(t) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

$${}^B \boldsymbol{\omega}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z(t) \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

最終的にロボットへの胴体運動指令 Ω は，以下のように定義される．

$$\Omega \equiv ({}^B \mathbf{v}(t), {}^B \boldsymbol{\omega}(t)). \quad (3.19)$$

3.3.3 デューティ比の計算

ロボットの歩行中の脚の状態として，支持脚相と遊脚相の二つの相を考えることができる．脚 $i(1 \leq i \leq n)$ が支持脚相にある期間を支持脚期間 τ_{Si} ，遊脚相にある期間を遊脚期間 τ_{Ti} とし，支持脚期間と遊脚期間の合計

$$\tau_i \equiv \tau_{Si} + \tau_{Ti} \quad (3.20)$$

を歩行周期 τ_i とする．ここで，脚 i の1歩行周期において支持脚期間の占める割合デューティ比 β_i は次式で定義される．

$$\beta_i \equiv \frac{\tau_{Si}}{\tau_i}. \quad (3.21)$$

ここでは，デューティ比は後述するように，胴体の運動速度に依存する．

ところで， U を脚の胴体に対する平均水平方向復帰速度とする． U はいわばロボットの機構的な限界速度と見なすことができる．世界座標系における歩幅は，脚位相変数一周の間に脚の基準点の移動する距離に等しいため，

$$\tau_i(t)(1 - \beta_i(t))(U_i(t) + u_i(t)) = \tau_i(t)u_i(t) \quad (3.22)$$

となる．各脚の U_i に同一の速度 U を設定して式(3.22)を変形すると，

$$\beta_i(t) = \frac{U}{u_i(t) + U} \quad (3.23)$$

なる関係が導かれる．これは歩行ロボットの脚 i が取り得るデューティ比の最大値である．しかしながら，脚先では胴体移動速度に加えてその回転運動に伴う速度成分を考慮する必要がある．また，ロボットの歩容がレギュ

ここで、歩行位相変数 (kinematic phase) ϕ は脚運動の一周期の時間を $[0,1]$ で正規化した位相変数であり、歩容線図の実線部分は支持脚相、空白部分が遊脚相である。また、 i 脚の脚位相差 (relative phase) ψ_i は歩行位相変数上での脚の接地タイミングを示している。

3.3.5 デューティ比可変ウェーブ歩容

ここで、測量ロボットは全方向移動が可能でかつ接地脚数を可変とするため、前方ウェーブ歩容を基に側行角 α とデューティ比 β を可変とし、より一般化された拡張ウェーブ歩容

$$\psi_i = \Psi_i(\alpha, \beta), \quad i=1,2,\dots,N \quad (3.26)$$

を適用することとした。この拡張ウェーブ歩容は当該測量ロボットと同じ6脚軸対象配置のアクアロボへ1号機への適用実績がある³⁵⁻³⁷⁾。ここでこの拡張ウェーブ歩容の導出過程とその数学的表現を示すこととし、まずはデューティ比可変ウェーブ歩容の数学的表現を示す。

側行角 $\alpha = \pi/6$ の場合は、軸対称型脚配置ロボットは左右対称型脚配置ロボットと見なすことができるため、側行角 α を $\pi/6$ に固定してこの場合の脚位相差 $\Psi_i(\pi/6, \beta)$ を求める。デューティ比 β は、式(3.24)によって設定されるため、胴体速度に応じて変化する。Fig.3.18 は、 $\beta = 5/6, 2/3, 1/2$ のときのウェーブ歩容の歩容線図である。まず、Fig.3.18 中の $\beta = 2/3, 1/2$ の場合を取りだし、これらの2つの線分を線形に内挿することで、デューティ比 $\beta \in [1/2, 2/3]$ の範囲の任意の値の時の脚位相差を得る (Fig.3.19)。同様に、これらに対して単に外挿を行うことで、デューティ比 $\beta \in (0,1]$ の全ての範囲の脚位相差を得ることができる (Fig.3.20)。その導出過程を次に示す。

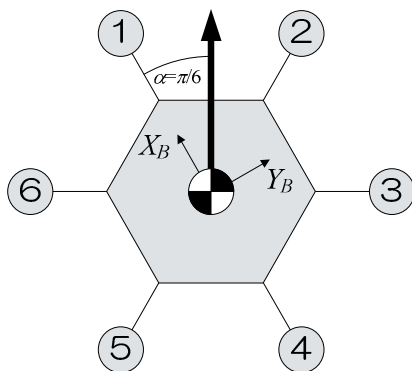


Fig.3.17 Axial-symmetric 6-legged robot.

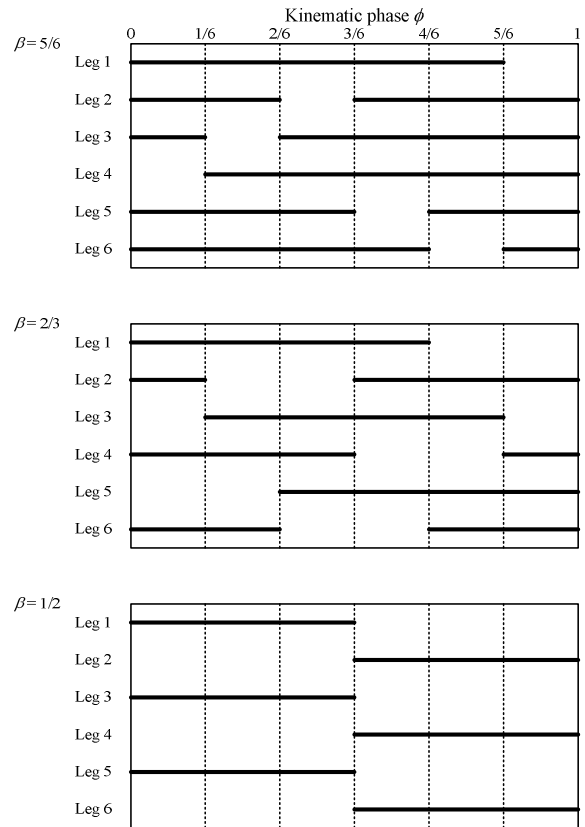


Fig.3.18 Gait diagram of forward wave gait of axial symmetric 6-legged robot ($\alpha = \pi/6$).

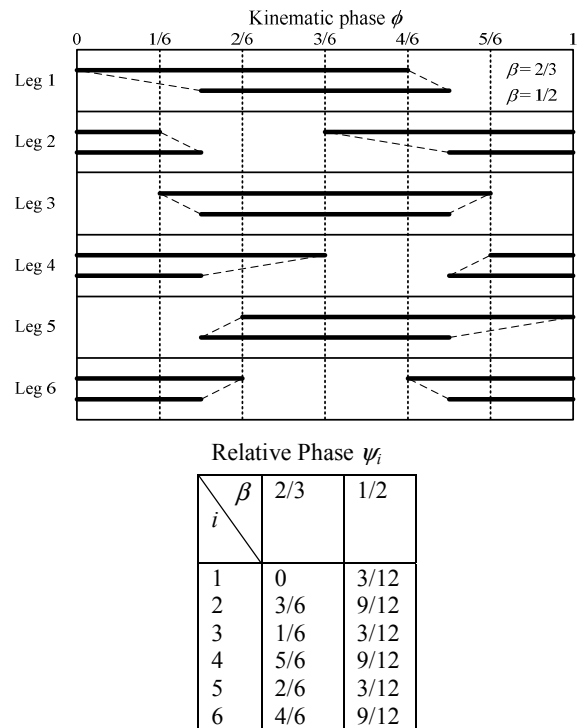


Fig.3.19 Gait diagram of forward wave gait with interpolation β ($\alpha = \pi/6$).

まず、2点を通る直線の式は次式で示される。

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}, \quad (3.27)$$

$$y = \frac{1}{x_2-x_1} \{(x-x_1)y_2 - (x-x_2)y_1\}.$$

式(3.27)に式(3.28)を代入して内挿及び外挿によって側行角 $\alpha = \pi/6$ の場合の脚位相差 $\Psi_i(\pi/6, \beta)$ を任意のデューティ比 $\beta \in (0, 1]$ における β の関数として式 (3.29) のように導出できる。

$$\begin{cases} x = \beta \\ y = \Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \beta\right) \\ x_1 = \frac{1}{2}, \quad x_2 = \frac{2}{3} \\ y_1 = \Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \frac{1}{2}\right), \quad y_2 = \Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \frac{2}{3}\right) \end{cases} \quad (3.28)$$

$$\Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \beta\right) = [6\{(\beta - \frac{1}{2})\Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \frac{2}{3}\right) - (\beta - \frac{2}{3})\Psi_i\left(\frac{\pi}{6}, \frac{1}{2}\right)\}]_{\text{mod } 1}. \quad (3.29)$$

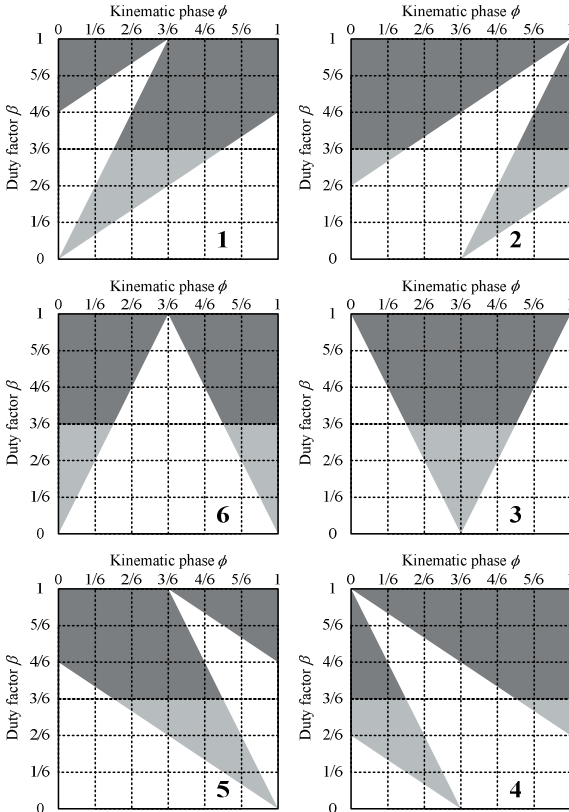


Fig.3.20 Gait diagram of β variable forward wave gait in case of $\alpha = \pi/6$ (Support phase; gray).

3.3.6 側行角可変-デューティ比可変前方ウェーブ歩容

軸対称脚配置を有するロボットについて、全方向性運動を行なった場合、後向きに進んだ場合は後方ウェーブ歩容と等価になるため、安定余裕が低下してしまう。そこで、これを避けるためにウェーブの方向を進行方向に対して変化させることで、前方ウェーブ歩容と同等の安定余裕を得ることを目指す。まず、デューティ比を固定して、任意の側行角の場合について考える。

Fig.3.21 において、 $\beta = 2/3$ に固定して、上段の線分は $\alpha = \pi/6$ のときの、そして、下段の線分は $\alpha = -\pi/6$ のときの支持脚相を示している。これらの線分を内挿することで、その間の任意の側行角に対する歩容が得られる。デューティ比を固定した際は、側行角を $[0, 2\pi)$ の範囲に拡張することは容易である。

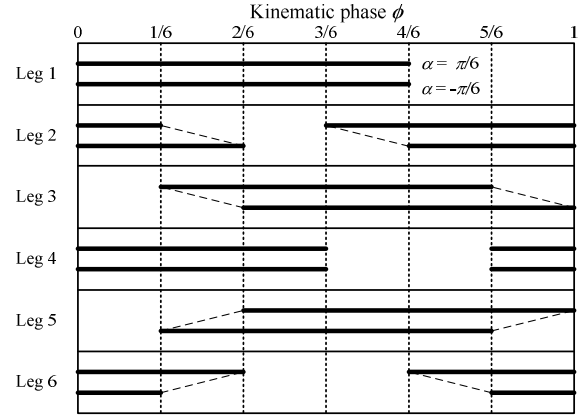


Fig.3.21 Gait diagram of forward wave gait with interpolation $\alpha(\beta=2/3)$.

Fig.3.22 は $\beta = 2/3$ と $\beta = 1/2$ の場合の脚位相差 $\Psi_i(\alpha, \beta)$ を示しており、これは脚の接地のタイミングを意味する。この関数は次のように表される。

for $i = 1, 3, 5$

$$\Psi_i\left(\alpha, \frac{2}{3}\right) = \begin{cases} 0 & (0 \leq \alpha' < \pi/6) \\ \alpha'/2\pi - 1/12 & (\pi/6 \leq \alpha' < 5\pi/6) \\ 1/3 & (5\pi/6 \leq \alpha' < 7\pi/6) \\ 11/12 - \alpha'/2\pi & (7\pi/6 \leq \alpha' < 11\pi/6) \\ 0 & (11\pi/6 \leq \alpha' < 2\pi) \end{cases}$$

$$\Psi_i\left(\alpha, \frac{1}{2}\right) = 1/4$$

for $i = 2, 4, 6$

$$\Psi_i(\alpha, \frac{2}{3}) = \begin{cases} 1/2 & (0 \leq \alpha' < \pi/6) \\ \alpha'/2\pi + 5/12 & (\pi/6 \leq \alpha' < 5\pi/6) \\ 5/6 & (5\pi/6 \leq \alpha' < 7\pi/6) \\ 17/12 - \alpha'/2\pi & (7\pi/6 \leq \alpha' < 11\pi/6) \\ 1/2 & (11\pi/6 \leq \alpha' < 2\pi) \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\Psi_i(\alpha, \frac{1}{2}) = 3/4$$

ここで,

$$\alpha' = \left[\alpha - \frac{2(i-1)\pi}{6} \right]_{\text{mod}(2\pi)} \quad (3.31)$$

である。

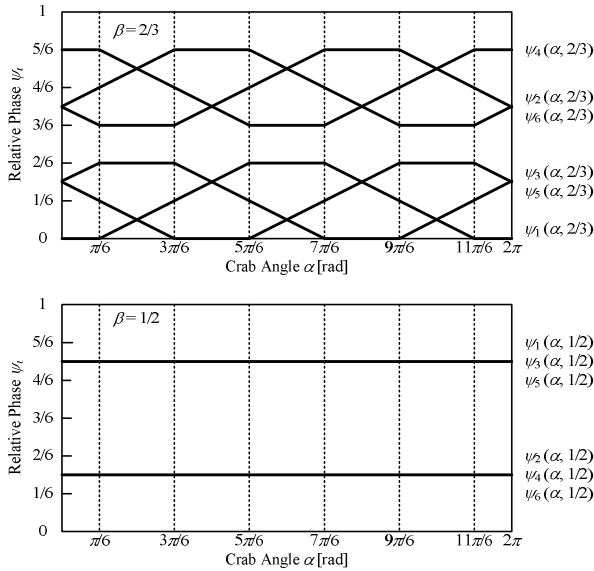


Fig.3.22 Relative phase of variable crab angle.

ここで、デューティ比が可変である場合を考える。 α と β が任意に可変である歩容を計画するために式(3.29)を用いる。式(3.29)の $\pi/6$ を α に置き換えることで次式を得る。

$$\Psi_i(\alpha, \beta) = \left[6 \left\{ \left(\beta - \frac{1}{2} \right) \Psi_i \left(\alpha, \frac{2}{3} \right) - \left(\beta - \frac{2}{3} \right) \Psi_i \left(\alpha, \frac{1}{2} \right) \right\} \right]_{\text{mod}1} \quad (3.32)$$

つまり,

$$\Psi_i(\alpha, \beta)_{i=1,3,5} = \left[6 \left\{ \Psi_i \left(\alpha, \frac{2}{3} \right) - \frac{3}{2} \left(\beta - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{4} \right\} \right]_{\text{mod}1}$$

$$\Psi_i(\alpha, \beta)_{i=2,4,6} = \left[6 \left\{ \Psi_i \left(\alpha, \frac{2}{3} \right) - \frac{3}{2} \left(\beta - \frac{1}{2} \right) + \frac{3}{4} \right\} \right]_{\text{mod}1} \quad (3.33)$$

この式が任意のデューティ比及び側行角に対して、常に前方ウェーブ歩容が実現される拡張ウェーブ歩容である。

3.3.7 安定余裕

静歩行により安定した歩行を行う測量ロボットは、その安定余裕を常に管理している。安定余裕 M は、ロボット重心の地面への投影点 c から支持脚多角形の各辺までの最短距離 L_i と重心の高さ H との比で表され、その最小値をもって安定余裕とする。安定余裕が1の場合、自重と同じ外力まで耐えることができることを意味している。なお、 N_s は支持脚数である。

$$M = \min_i \left(\frac{L_i}{H} \right) = \frac{\min(L_i)}{H}, \quad (3.34)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_s.$$

つまり、ここでは次図に示すとおり、外力と重力の合力ベクトルの延長線と地面との交点、すなわち地面反力の合力ベクトルの作用点が支持脚多角形の内側にある場合に限り、転倒せずに安定して歩行可能である。安定余裕が大きくなると、この反力の作用点は重心の投影点に接近する (Fig.3.23)。

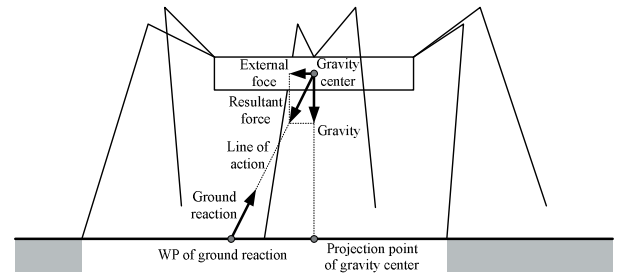


Fig.3.23 Model of robot.

次に L_i の逐次算出法を示す。支持脚多角形の各辺を直線 $\mathbf{x}_i = t\mathbf{b}_i + \mathbf{a}_i$ (t : 実数) として媒介変数表示すると、重心ベクトル \mathbf{c} と支持脚多角形の辺上の任意の点 \mathbf{x}_i までの線分ベクトルは $\mathbf{x}_i - \mathbf{c}$ となる。よって、その線分の最短距離 L_i は Fig.3.24 で示すとおり直線 \mathbf{x}_i に直交する場合である。

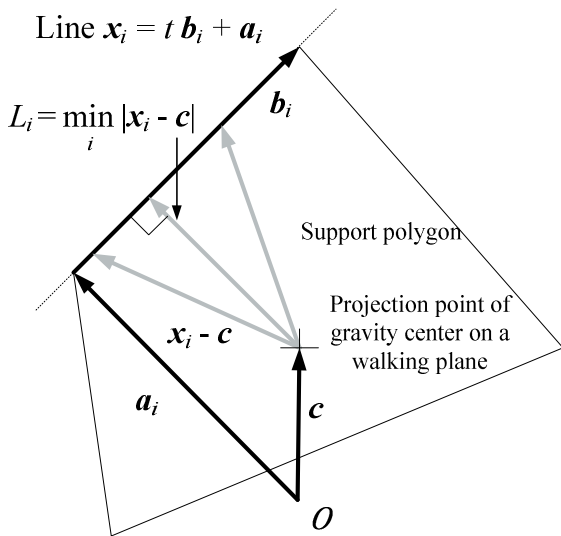


Fig.3.24 Calculational technique of stability margin.

ここで、 $|x_i - c|^2$ は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} |x_i - c|^2 &= |b_i|^2 t^2 + 2b_i \cdot (a_i - c)t + |a_i - c|^2 \\ &= |b_i|^2 \left(t + \frac{b_i \cdot (a_i - c)}{|b_i|^2} \right)^2 + \frac{(b_i \cdot (a_i - c))^2}{|b_i|^2} + |a_i - c|^2 \end{aligned} \quad (3.35)$$

よって、 $|x_i - c|^2$ は、

$$t = -\frac{(b_i \cdot (a_i - c))^2}{|b_i|^2} \quad (3.36)$$

で最小となり、その線分長 L_i は、

$$L_i = \sqrt{\min_i |x_i - c|^2} = \sqrt{\frac{(b_i \cdot (a_i - c))^2}{|b_i|^2} + |a_i - c|^2} \quad (3.37)$$

となる。この計算を各辺について逐次実施して $\min(L_i)$ を算出し、安定余裕 M を導出する³⁸⁾。

3.3.8 胴体傾斜の補正

ここではロボットの胴体の水平維持のための、胴体傾斜の逐次補正手法について述べる。次図に2種類の基本的な傾斜補正の方法を示す。「足元中心回転」の場合は「胴体中心回転」の場合と比較して計算は煩雑になるが安定余裕が高くなるため、ここでは常に「足元中心回転」

で胴体傾斜を補正することとした (Fig.3.25)。

つまり、「胴体中心回転」は、胴体の中心に胴体傾斜補正のための回転中心を設定するものであり、接地平面が傾いている場合には歩行面への重心位置の投影点が傾斜方向にずれてしまうことから、安定余裕が低下してしまう。一方、「足元中心回転」は、接地平面上に胴体傾斜補正のための回転中心を設定するものであり、歩行面への重心の投影点は常に中心付近となって、「胴体中心回転」と比較して安定余裕は低下しにくい。

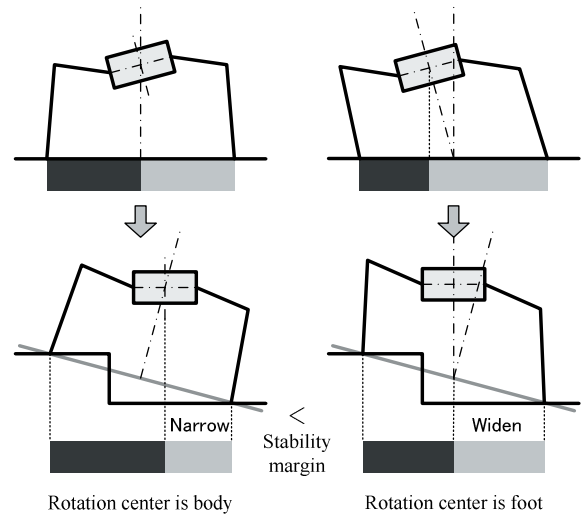


Fig.3.25 Changes of stability margin arise from the difference of rotational center.

以下に足元を回転中心とする胴体傾斜補正のための同次変換行列を示す。

$$\begin{aligned} & \text{平行移動} \quad z \quad x \quad y \\ {}^w_B T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_z & -S_z & 0 & 0 \\ S_z & C_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_x & -S_x & 0 \\ 0 & S_x & C_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_y & 0 & S_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_y & 0 & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C_z C_y - S_z S_x S_y & -S_z C_x & C_z S_y + S_z S_x C_y & x \\ S_z C_y + C_z S_x S_y & C_z C_x & S_z S_y - C_z S_x C_y & y \\ -C_x S_y & S_x & C_x C_y & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.38)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \theta_{o_x}, \theta_{o_y}, \theta_{o_z}: & \text{観測された測量ロボットの胴体傾斜} \\ \theta_x, \theta_y, \theta_z: & \text{胴体傾斜の補正量, ただし } \theta_z \text{ は胴体方位} \\ S_x = \sin \theta_x, \quad C_x = \cos \theta_x, \\ S_y = \sin \theta_y, \quad C_y = \cos \theta_y, \\ S_z = \sin \theta_z, \quad C_z = \cos \theta_z. \end{aligned}$$

胴体傾斜の補正は、測量ロボットの順運動学の同次変換行列の最終段に傾斜補正の変換行列を掛けることで行う。補正量は測量ロボットに設置した傾斜計で現在の傾斜量 θ_{ox} , θ_{oy} , θ_{oz} を観測し、次式にて逐次決定する。

$$\begin{aligned}\theta_x(t+\Delta t) &= \theta_x(t) - k_{P\theta}\theta_x(t)dt - k_{D\theta}\{\theta_x(t) - \theta_x(t-dt)\} \\ \theta_y(t+\Delta t) &= \theta_y(t) - k_{P\theta}\theta_y(t)dt - k_{D\theta}\{\theta_y(t) - \theta_y(t-dt)\}.\end{aligned}\tag{3.39}$$

ただし、

$k_{P\theta}$: Proportional gain
 $k_{D\theta}$: Derivative gain
 dt : Computational cycle.

ここで、胴体傾斜の逐次補正シミュレーションの実施状況を Fig.3.26 に示す。この図から、斜面上を歩行するロボットの胴体が本手法によって水平に保持されていることが確認できる。

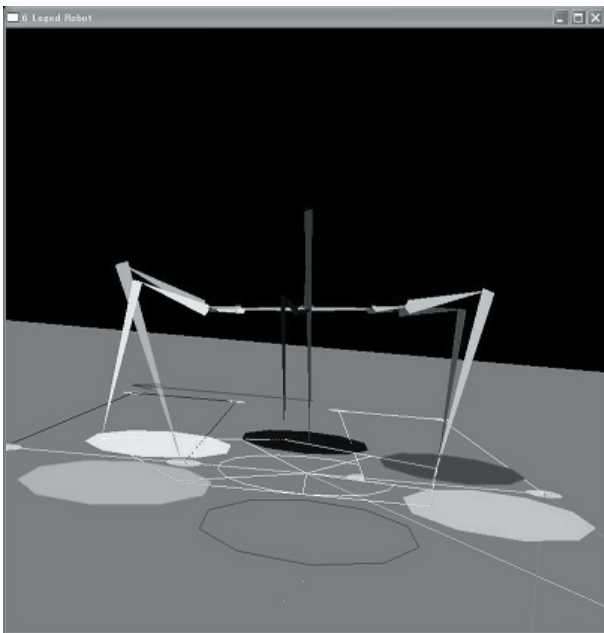


Fig.3.26 Successive correct simulation of the body inclination.

3.3.9 段差への対応

ロボットの胴体高さは歩行基準平面 (Reference plane) から常に一定となるよう制御されるが、ロボットの足先の接地目標平面 (Contact target plane) は想定される凹凸の分だけ段差余裕 (Roughness margin) を設け、基準面か

らさらに下方に設定する。このことにより、ロボットは歩行基準平面より高い段差と低いくぼ地の両方に対応することができる。

なお、歩行中、接地センサによって接地を検知した脚は、ただちに遊脚相から支持脚相に切り替わることとなる (Fig.3.27)。すなわち、凹凸のない基準面上をロボットが歩行する場合には、段差余裕分だけ早く脚が接地することとなり、デューティ比が増加する。

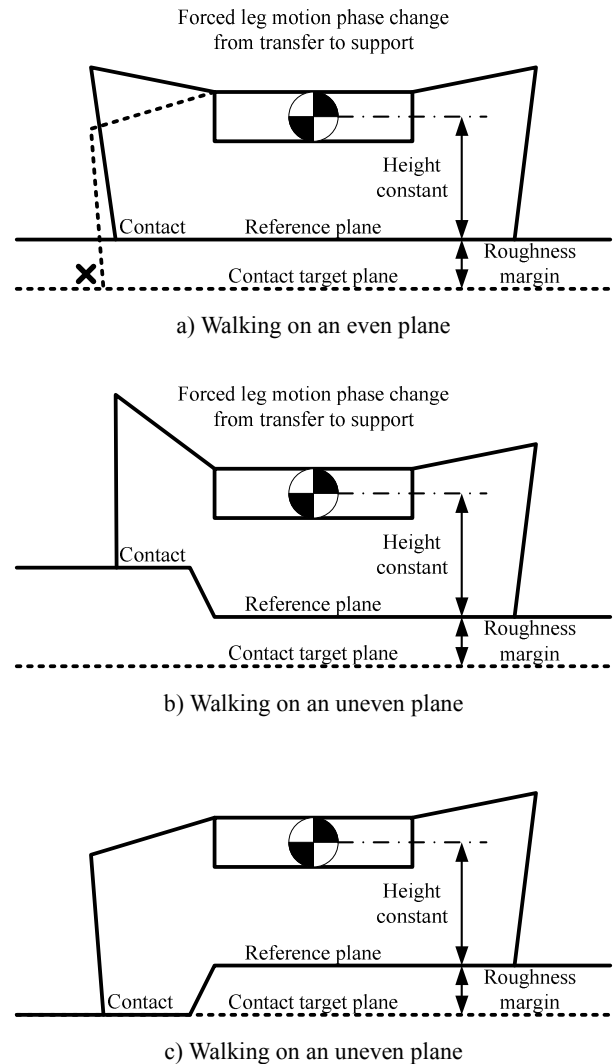


Fig.3.27 Appearance of walking of robot.

3.3.10 ロボットの誘導

自動測量システムにおける測量ロボットの位置情報としては、①トータルステーションからの位置情報のフィードバック、②歩行動作からの位置情報の推定、の2つの情報の利用が可能である。前者は砂浜に設置したトータルステーションによって測位されたロボットの位置情報をホスト PC から無線 LAN を介してロボットへ送るこ

とで利用可能となり、広範囲にわたってロボットの誘導を行う場合に利用する。後者はオドメトリーに類似した方法で、外界からの測位情報を全く利用しない歩行動作からの位置の推定であり、小範囲における誘導やトータルステーションの欠測時に利用する。

通常、ロボットはこれらの位置情報を排他的に利用することとなるが、トータルステーションからのフィードバックを利用する場合にはロボットの位置情報の更新間隔 τ sec を適度にとって更新し、その間の位置情報は歩行動作からの推定結果を利用する。また、磁気方位計はモーターの動作に影響されたことからロボット本体には設置できなかったため、足の滑りなどによって変化してしまう自機の方位は、位置の更新間隔 τ sec ごとのロボットの移動結果を利用して逐次修正することとした (Fig.3.28)。この場合、式(3.40)に従って目標値を逐次更新し、これらに滑らかに追従するよう制御される^{27, 39)}。

$$\begin{aligned} P(t+\tau) &= P_m(t+\tau), \\ \theta(t+\tau) &= \theta(t) + \theta_e(t+\tau), \\ \alpha(t+\tau) &= \phi(t+\tau) - \theta(t+\tau). \end{aligned} \quad \begin{cases} t; \text{Current time} \\ \tau; \text{Update interval} \end{cases} \quad (3.40)$$

つまり、ロボットは τ sec 経過後に、自己の推定位置 $P(t+\tau)$ と計測位置 $P_m(t+\tau)$ を比較し、その移動結果から方位誤差 $\theta_e(t+\tau)$ を逆算する。同時に、推定位置 $P(t+\tau)$ を計測位置 $P_m(t+\tau)$ に更新し、位置誤差の原因となった胴体方位 $\alpha(t+\tau)$ を $\alpha(t) + \theta_e(t+\tau)$ に更新する。ここで、次の中継点を目指すための側行角は、その中継点方向である必要がある。よって、側行角 $\alpha(t+\tau)$ を残存方位誤差 (現位置から次の中継点を結ぶ線と本来の測線がなす角) から現在の胴体方位を引いた角度 $\phi(t+\tau) - \alpha(t+\tau)$ に更新することで、その進行方向は次の中継点方向となる。

以上のルールに基づいてロボットを制御・誘導するシステムを構築した。ロボットの順逆運動学に基づく脚の制御、安定余裕の算出、ウェーブ歩容の生成などのロボ

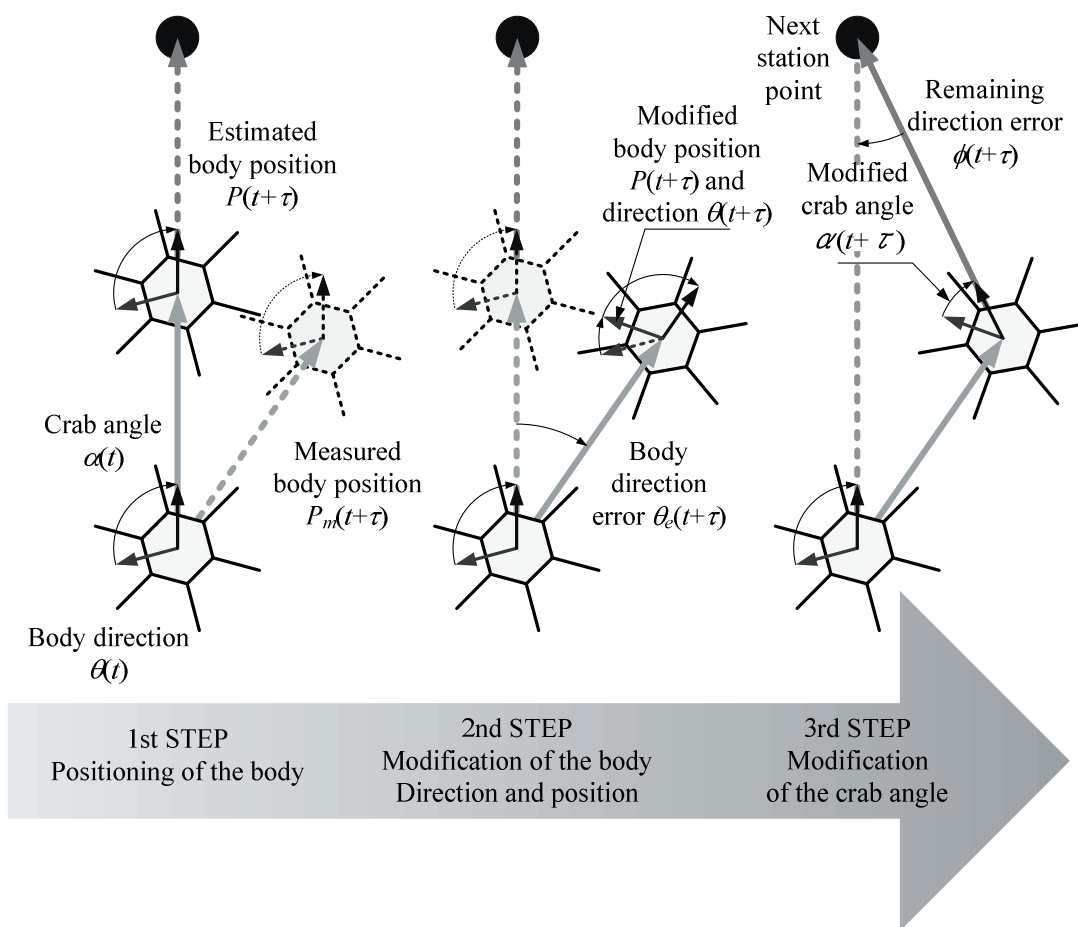
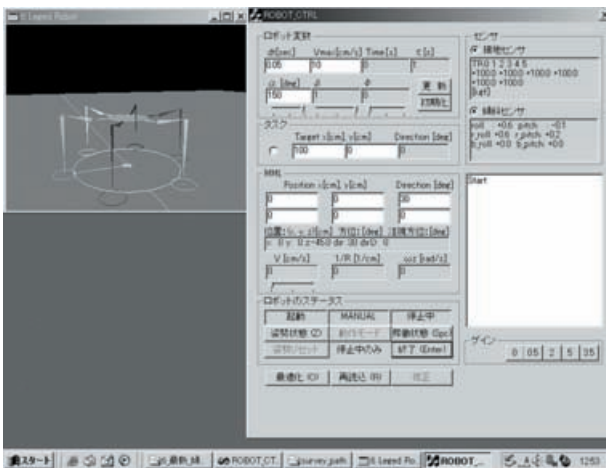


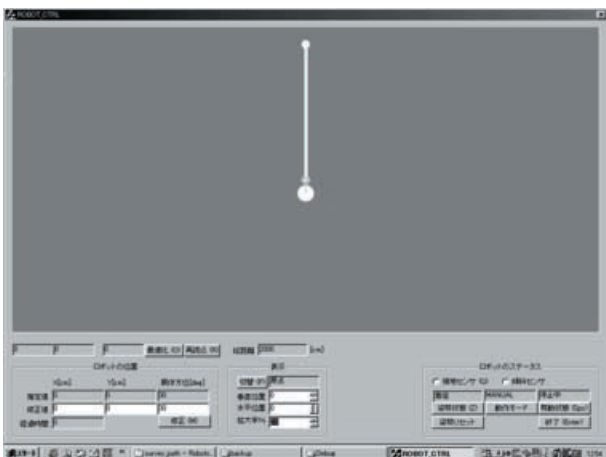
Fig.3.28 Navigation method with feedback from total station and the position estimation.

ット自体の運動にかかる制御についてはロボット内部に搭載した制御用 PC (ロボット側 PC) 上で実行されるソフトウェアで行う。一方、ロボットの誘導経路はウェイポイント (二次元位置, 経由順序) としてホスト PC 上で作成および管理され, この誘導経路を汀線測量時の測線として利用する。また, ロボットとホスト PC は無線 LAN での接続が常時確立されており, ロボットの制御状態をホスト PC 上から確認可能であると同時に, ホスト PC 側に接続されたトータルステーションによる測位情報をロボットに送信する。加えて, ホスト PC 上から無線 LAN 経由での作業開始や停止などの指示を行う。

Fig.3.29 にロボット側 PC 上で動作する制御ソフトウェアの実行画面と, ホスト PC 上で動作する誘導管理ソフトウェアの実行画面を示す。



a) Execution screen of the robot side PC software (controller)



b) Execution screen of the host PC software (state monitor)

Fig.3.29 Software of automated shoreline survey system.

3.4 汀線測量実験

本実験は提案する測量手法の検証のために開発した実験装置について, 一連の動作を現地海岸で確認するためのものであり, 加えて装置の海岸砂地への対応状況についても確認するためのものである。またその過程において, 現地海岸における汀線部の地形測量を当該システムによって試みることで, 提案手法の妥当性を検証するものである^{27,37)}。

Fig.3.30 に現地試験場所を示し, Fig.3.31 に現地試験の実施状況を示す。また, Table 3.5 に実験時のロボットの制御条件を示す。

実験場所：新潟県新潟市 新潟西海岸 (第一突堤および第二突堤の間)

実施期間：平成18年3月14日 (火)
～平成18年3月16日 (木)

測量実験1：第一突堤と第二突堤間の気中部の地形測量実験

測量実験2：第一突堤と第二突堤間の碎波帯の地形測量実験

Table 3.4 Primary equipments of field experiment.

Items	Specifications	No. of pieces	Remarks
Survey robot	Walking type (95kg)	1	As prism-man
Auto tracking total station	TOPCON GTS-820A (Up to 800m)	1	Positioning
Generator	HONDA EX6 (600VA)	1	For PC etc
Host PC	Panasonic toughbook CF-18 with wireless LAN for long-range communication (Up to 1km)	1	For state monitor and survey path controll

Table 3.5 Field experimental conditions.

Length of stride	20	cm
Foot lift height	12.5	cm
Body height	45	cm
Maximum velocity	8	cm/sec
Minimum duty factor	0.556	-

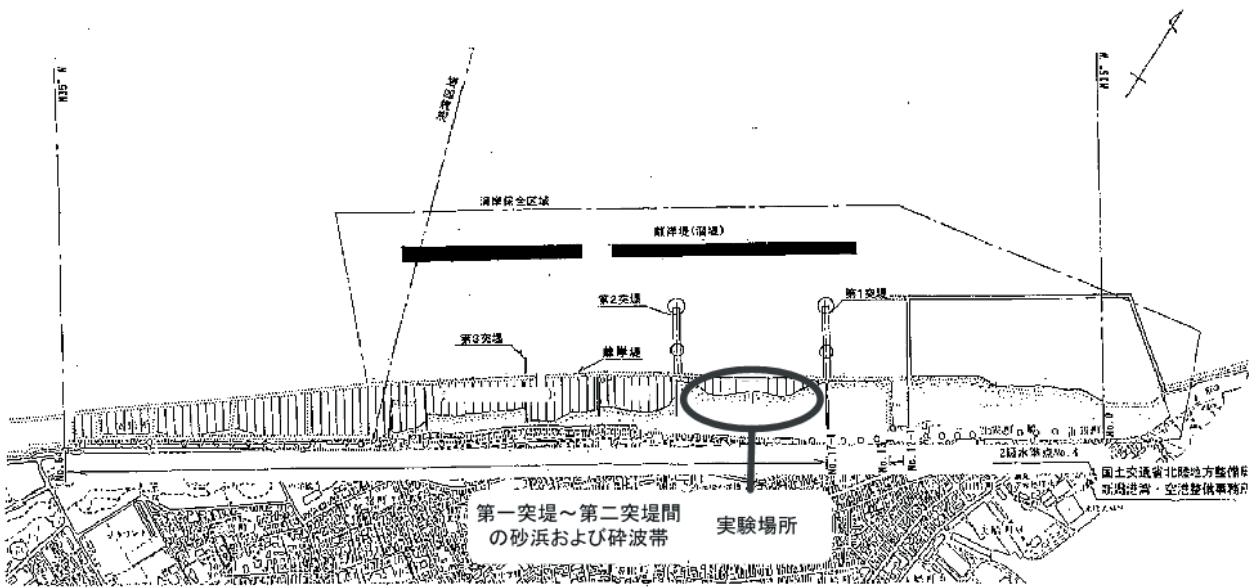


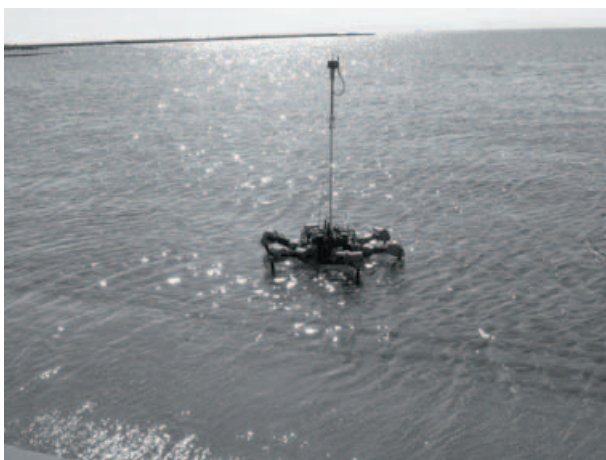
Fig.3.30 Experimental field (Niigata West Coast).



a) Walking on the land part



b) Shore-based support equipments



c) Walking into the surf zone



Fig.3.31 Appearance of field test while shoreline surveying.

測量ロボットが測線上を歩行する際は、各ウェイポイント上で一旦停止して次の測線に移動する。すなわち、加速時はウェイポイントから 1.0m の距離を一定加速度で加速して、設定された最大移動速度に到達して等速歩行に移行することとし、減速時はウェイポイントの 1.0m 手前から一定加速度で減速して、ウェイポイント上で停止することとし、その速度プロフィールは台形プロフィールとなる。よって、測量ロボットの加速度 a は次式で決定する。

$$a = \pm \frac{u_{\max}^2}{2L_{acc}} \quad (3.41)$$

ここで試験時の最大速度は $u_{\max}=8\text{cm/sec}$ 、加減速距離は $L_{acc}=100\text{cm}$ であるため、測量ロボットの加減速時の加速度は $a=\pm 32\text{cm/sec}^2$ である。

3.4.1 基準点と測線の作成

実験用の座標系の設定にあたり、ここでは新潟西海岸公園に設置されている四等三角点を利用した（点名：西海岸公園，基準点コード：5639-70-2402）。

基準点情報を Table 3.6 に示し、その位置を Fig.3.32 に示す。

Table 3.6 Control point information.

CP code	5639-70-2402
Type	4 th -order triangulation point
“Kanji” No.	K 成 3
Point name	Nishi-kaigan koen
Latitude	37°56'14".4618
longitude	139°3'2".0043
Altitude	10.96m
Geoid height	38.27m

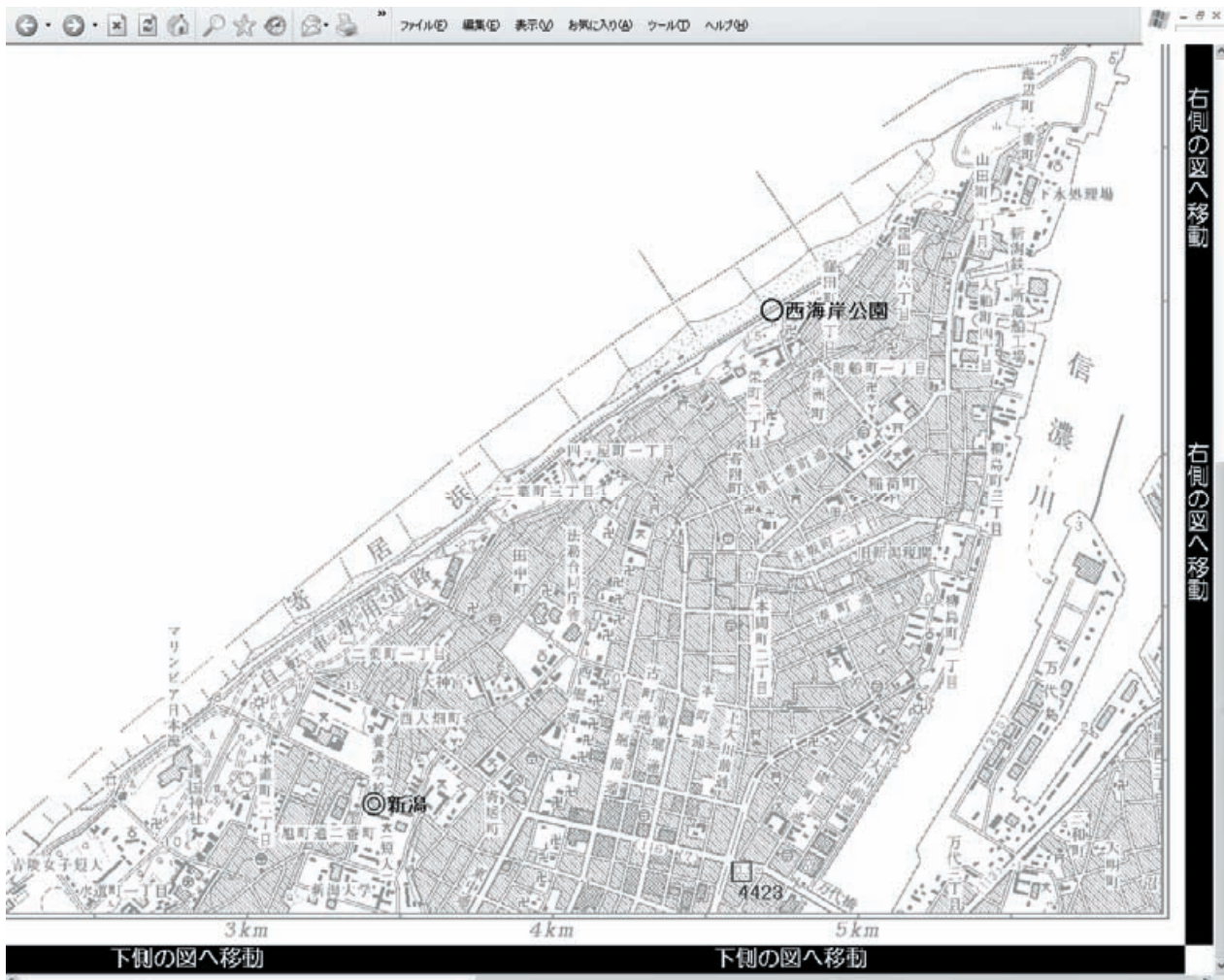


Fig.3.32 Utilization of a benchmark of Geographical Survey Institute (Geographical Survey Institute, <http://cpservice.gsi.go.jp/kijunten2k/>) .

汀線測量の原点および座標系の設定手順の模式図を Fig.3.33 に示す。

砂浜の任意の位置に設置されたトータルステーションを原点(0, 0, 0)として、三角点を点①として測量する。次に点①から隣接道路（遊歩道）に平行に西（南西）方向へ 10m 離れた点を点②とし測位する（高さ不要）。さらに①-②に直交（すなわち道路・海岸に直交）し、原点から海方向へ 10m 離れた点を点③とおく。トータルステーションを点③に向けた状態でトータルステーションをリセットする。

この結果、トータルステーションによって計測される測量結果は、トータルステーションの設置位置が原点 (0, 0, 0) となり、座標系の X 軸は海側を正とする海浜の横

断方向（海岸線に直交する方向）に設定され、Y 軸は東（北東）方向を正とする海浜の縦断方向に設定される。

なお、この座標系から三角点①を測量したところ、(-125.805, 17.863, 9.57)であった。ポール高さは 1m なので実際の位置は(-125.805, 17.863, 8.57)となる。すなわち、トータルステーションによる測量結果からこの値を減じれば三角点を原点とする測量結果が得られ、さらに高さに三角点の標高を加えれば測量点の高さは標高として観測可能である。

ここでは三角点(x_0, y_0)から(+125, +25)離れた地点を人力およびロボットの場合ともに測量の起点として設定し、そこから海浜を横断する方向に測線を設定した。

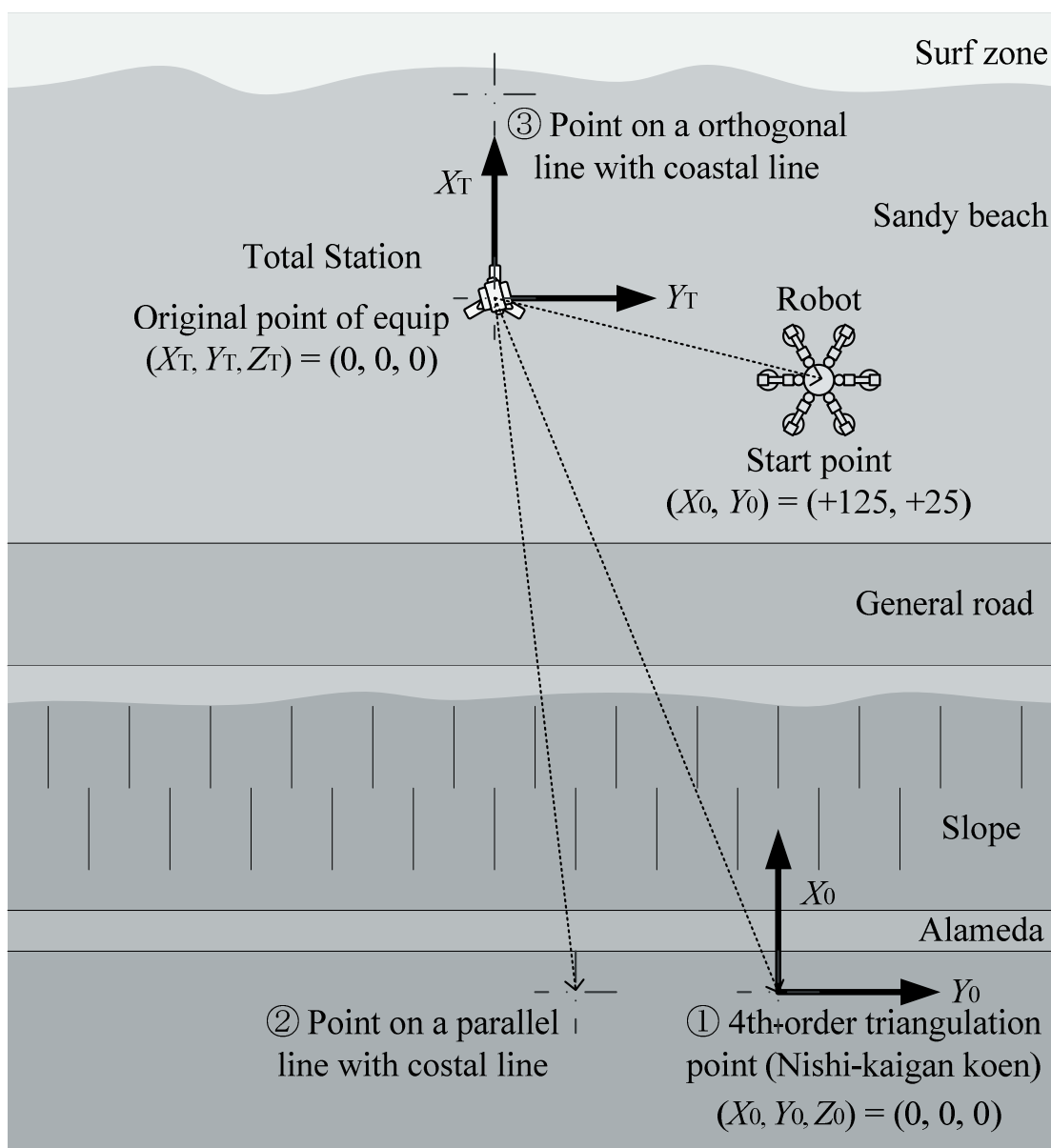


Fig.3.33 The Setting method of the coordinate systems and the original point of survey.

3.4.2 気中部の測量（測量実験1）

まず、自動測量システムによる測量結果を検証するために実験で用いる測線上の点について人力測量を実施した。ここでは三角点 (x_0, y_0) から $(+125, +25)$ 離れた地点を起点として、横断方向に測線を取り、測点は通常の方法に則り測線上の5mごとに測量を行った。

人力測量と同様に、三角点 $(x_0, y_0)=(0, 0)$ から $(+115, +25)$ 離れた地点をロボットの測量起点として横断測量を実施し、海浜の断面地形を連続的に取得した。検証用の人力測量結果と合わせて自動測量の結果を Fig.3.34 と Table 3.7 に示す。

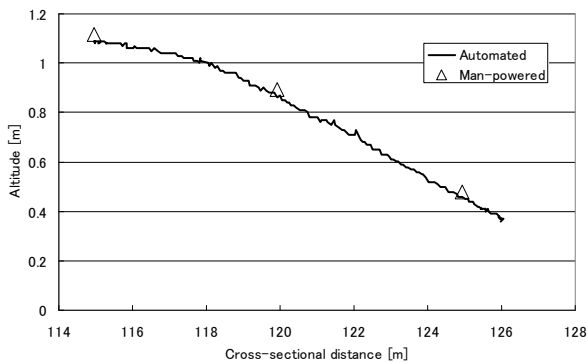


Fig.3.34 Comparison of automated with man-powered cross-section view of the beach (Land part).

Table 3.7 The differences between man-powered and automated survey.

Point No.	Level (Automated)	Level (Man-powered)	Difference e
1	1.09 m	1.118 m	-28 mm
2	0.86 m	0.893 m	-33 mm
3	0.46 m	0.480 m	-20 mm

この結果、自動測量の結果は人力測量の結果と比較して総じて50mm以内の差にとどまっております、この実験時の足部の沈下は微小であった。また、自動測量と人力測量の誤差の平均、分散（標本分散、普遍分散）、標準偏差を次式に示す。

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i = -27 \text{ mm.} \quad (3.42)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 \approx 2.87 \times 10^{-5}, \quad (3.43)$$

$$\sigma_e \approx 5.35 \text{ mm.}$$

$$\sigma_e'^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 \approx 4.3 \times 10^{-5}, \quad (3.44)$$

$$\sigma_e' \approx 6.56 \text{ mm.}$$

ここでは誤差の平均が27mmであるのに対して標本分散に基づくばらつきは5.35mm、不偏分散に基づくばらつきは6.56mmであり、双方の地形の傾向は合致した。

3.4.3 水中部の測量（測量実験2）

測量実験1と同じ測線の延長線上の砕波帯について、三角点 $(x_0, y_0)=(0, 0)$ から $(+125, +25)$ 離れた地点をロボットの測量起点として横断測量を実施し、海浜の断面地形を連続的に取得した。人力測量結果と合わせて Fig.3.35 に示す。

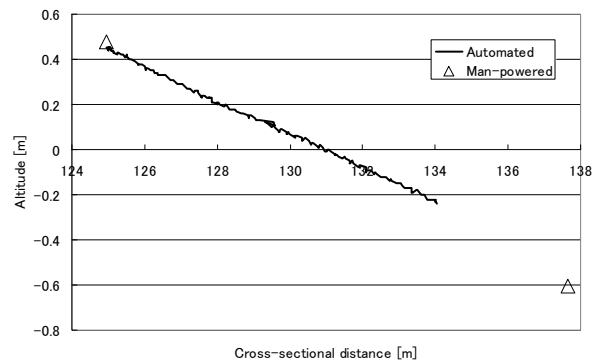


Fig.3.35 Comparison of automated with man-powered cross-section view of the beach (Surf zone).

ここでの自動測量の結果は人力測量の結果と比較すると、地形の傾向は合致した。なお、測量実験1と同様に足部の沈下は微小であった。

3.4.4 測量結果の後処理

ここでは、測量実験1で得られた海浜断面と測量実験2で得られた海浜断面の結合を試みたところ、2つの実験で得られた地形情報には齟齬はなく容易に結合できた。結合した海浜の断面図を Fig.3.36 に示す。

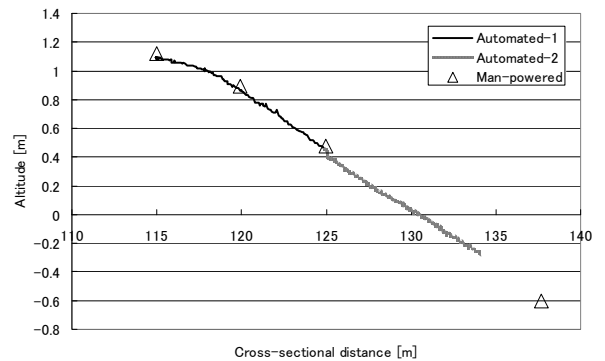


Fig.3.36 Comparison of automated with man-powered cross-section view of the beach (Land part and surf zone)

また、ここでは測量実験1で得られた海浜断面の地形情報とそれに引き続いて取得した直交する縦断方向の地形情報からコンター図の作成を試みた。ここで作成したコンター図は、ロボットの稼働時間の制約から測線を多く取ることはできなかったが、面的な地形情報を構成するデータが収集できたため、ロボットによる自動測量からコンター図の生成までの一連の作業を実施することができた。

自動測量システムによって取得した地形情報から作成したコンター図を Fig.3.37 に示す。

以上の結果により、この自動汀線測量システムによって生成可能なコンター図は、測線や取得するデータ数を増やすことで、より広範囲にわたった複雑な地形についても表現できる。また、この自動汀線測量システムは、これまでに示した測量実験の結果が示すとおり、陸上から碎波帯、ひいては水中までを同一の機器、同一手法で測量可能な手法であり、スタッフマンに代わるプリズマンとして水陸両用型歩行ロボットを測量システムに組み込むことで当該システムは成立した。

3.5 提案手法の導入効果に関する考察

現行手法においては、技師1人、技師補1人、助手2人で汀線測量作業が行われているが、提案手法においては、測量ロボット1台に加えて技師1人、助手1人程度の人員でシステムを運用可能である。よって、プリズマンとなる測量ロボットの作業能力がスタッフマンと同程度である場合、単純比較で次の条件を満たす場合に費用の縮減効果が発生する。

測量ロボットの損料

$$\text{< 技師補1の person 費} + \text{助手1の person 費} \quad (3.45)$$

一方、この測量ロボットの作業能力、すなわち水陸での移動速度は最大 15cm/sec、現地試験時で 8cm/sec であった。1日当たりの現地での全作業時間を8時間として、ここから準備と撤収、バッテリー交換などの作業時間を除いて稼働時間を5時間と見積もった場合、最大作業能力は 2.7km/日、現地試験時の作業能力で 1.44km/日と見積もることができる。横断測量における作業能力 1.44km/日から 2.7km/日は人力と同程度の作業能力である。なお、

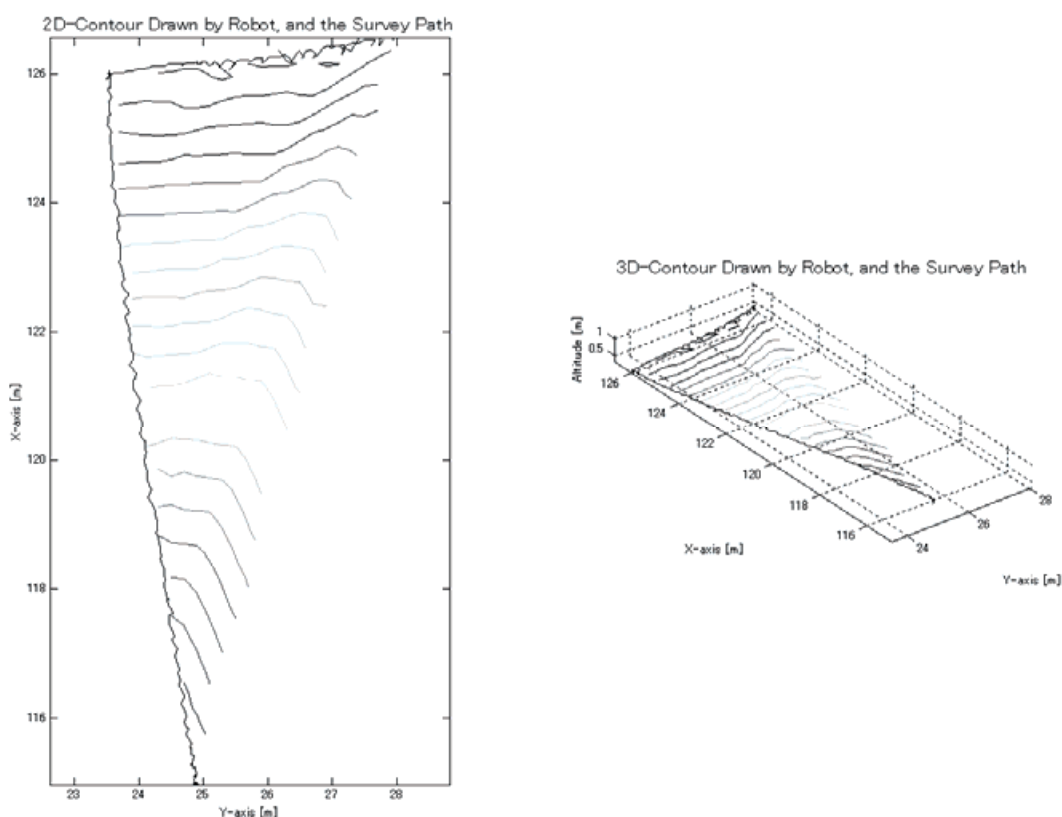


Fig.3.37 Contour plot made by automated survey.

現状の試験機の NiMH 電池 28.8V8Ah での連続稼働時間は約 0.8h であるため、1 日の稼働には 6 回程度バッテリーの交換作業が必要となるが、約 2 倍のエネルギー密度を有する Li-ion 電池に変更すれば稼働時間の倍化が可能であり、バッテリー交換作業の半減が期待できる。

ここで、測量ロボットの原価を 10,000 千円、償却期間を 3 年、年間保守費用を 300 千円、年間稼働日数 120 日（複数の現場での利用を想定）と設定して損料を試算すると、27,500 円/day となる。人件費の積算単価は明示できないが、この損料を用いると測量ロボットによる横断測量作業の期間および費用は、ともに人力のみと同程度か若干の費用縮減が期待できる。さらに、横断測量作業だけでなく、作業の自動化によって測量結果の図化作業などの成果物の作成作業についても作業時間の短縮が見込まれ、作業全体において費用の縮減が期待できる。また、複数の測量ロボットを同時に稼働させて作業効を向上できる場合は、一層の作業期間の縮減が期待できる。

4. 港湾整備にかかる水中作業の無人化手法の開発 — 海洋浮体構造物の係留装置の点検作業 —

近年、宮城県沖地震をはじめ、東海、東南海及び南海地震などの発生確率が示され、これらの海溝型地震に伴う津波に対する防災システムの充実が喫緊の課題となっている。東北地方整備局では平成 18 年度から防災システムの中核をなす沖合洋上ブイの変位を計測して津波を含

む波浪を観測する GPS 波浪計を全国に先駆けて岩手県南部沖（釜石沖）と宮城県中部沖（金華山沖）に設置した。本防災システムの整備は平成 19 年度より全国展開が始まっているが、将来にわたってその円滑な運用にあたっては設備の定期的な点検が不可欠である。しかしながら、波浪計の設置場所は海象条件の厳しい沖合で、かつほとんどが水深 100m 以上の海域であり、特に係留装置の点検作業を人力により実施するのは危険を伴い非常に困難な状況にある。

そこで本研究開発は、GPS 波浪計の係留装置に沿って自律的に移動して各種情報を取得することにより、潜水士に頼らずに GPS 波浪計の係留装置の点検作業を実施可能な水中無人点検システムの開発を行うものである。

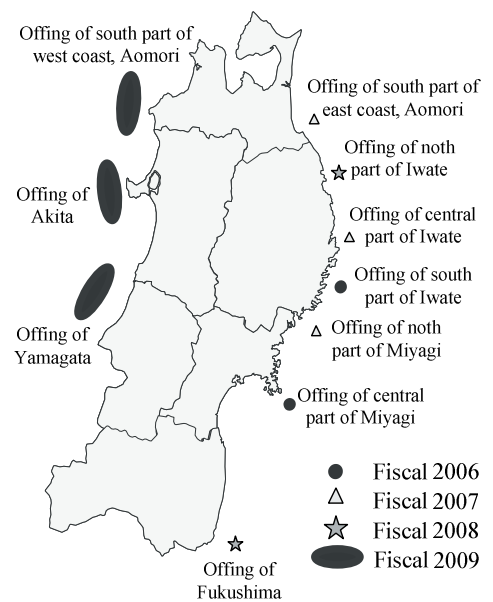
東北地方整備局では、他局に先駆けて平成 18 年度末の岩手県南部沖（釜石沖）と宮城県中部沖（金華山沖）の 2 箇所への GPS 波浪計の設置を実施し、青森県東岸南部沖（八戸沖）、岩手県中部沖（宮古沖）、宮城県北部沖（広田湾沖）などへも GPS 波浪計の設置が進められ、平成 21 年 3 月現在、管内の計 7 箇所に GPS 波浪計を設置している。また平成 20 年 7 月には、先行の岩手県南部沖（釜石沖）と宮城県中部沖（金華山沖）の GPS 波浪計は、気象庁に波浪情報等を配信する形で本格運用を開始した。

Fig.4.1 に釜石沖に設置された GPS 波浪計と、東北地方整備局管内における GPS 波浪計の設置状況と整備計画を示す。

GPS 波浪計の安全かつ確実な運用のためには装置の点



a) GPS wave meter settled off the coast of Kamaishi



b) Settling condition and preparation plans

Fig.4.1 Current settling condition and preparation plans of GPS wave meters in Tohoku Regional development Bureau.

検作業は不可欠であり、既に計測器類の点検は定期的
に実施されている。一方、係留装置の健全度について
は、大きな繰返し荷重や摩擦などの一層厳しい環境
にありながら、設置からの経過期間がまだ短いこ
と、年間 1mm の損耗を想定した設計余裕の観点か
ら、現段階では特段の点検は実施されていない。し
かしながら、中長期にわ

たる運用においては、係留装置についても相応の
経年変化が想定されることから、その損耗量が常
に許容範囲にあることを把握しておく必要がある。

Fig.4.2 に整備局から要望されている係留装置の
点検部位を示す。

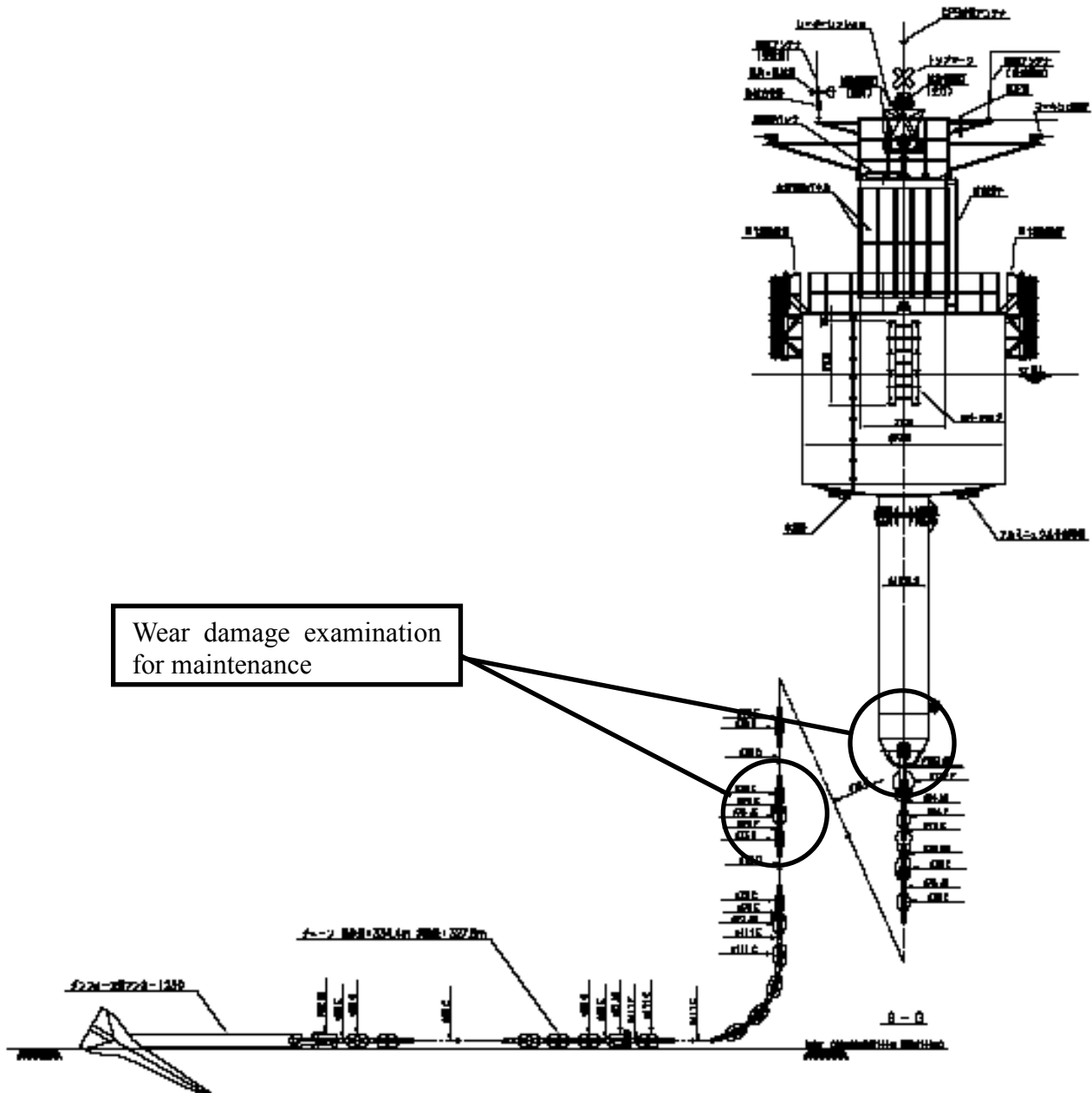
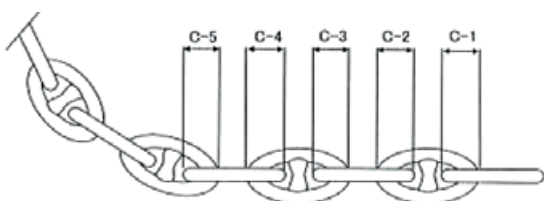


Fig.4.2 Expected mission of maintenance examination in situ.

4.1 現状の係留装置の点検手法

現在実施されている浮体の係留装置の点検事例として、東京湾に敷設されている灯浮標の係留装置の磨耗度の点検事例を示す。

点検手法は浮体が敷設されている箇所に潜水士が入り、所定箇所の寸法をノギス等で直接計測することでその磨耗量を把握するというものである。ここでは特に係留装置が海底と接触している箇所について、鎖のコマ同士が接続している部分の寸法を計測している。この場合、鎖のコマがかみ合っている部分を直接的に計測できないことから、二つの鎖のコマの線径の合計として計測している。具体的には Fig.4.3 に示す C-1 から C-5 の位置の寸法を計測している。



a) Measured points of lighted buoy's chain (from C-1 to C-5)



b) Mooring facility of lighted buoy in Tokyo Bay

Fig.4.3 measured point of mooring facility of lighted buoy (Tokyo Bay)

GPS 波浪計においても係留装置各部の損耗度合いの把握の重要性が指摘されており、灯浮標の場合と同様に鎖のコマ同士が接続している部分の寸法を計測することが

求められているが、GPS 波浪計の設置海域の厳しい海象条件下では潜水士による直接計測作業は現実的でない。ここでは、画像を利用した寸法計測手法の適用を考える。

4.2 画像計測

4.2.1 計測原理

固定された光学系においては、同一寸法の物体を撮影した場合、撮影された被写体の画面上での大きさ「撮影画素数 N 」と「撮影距離 L 」は一次の反比例関係にあり、その逆数は次式のような一次の比例関係で表すことができる。

$$\frac{D}{N} = \frac{1}{N_{D=1\text{mm}}} = aL + b \text{ [mm/pixel]} \quad (4.1)$$

すなわち、事前にこれらの a と b を同定しておけば、「被写体の実寸法 D 」は「撮影距離 L 」と「撮像素素数 N 」の2つの計測値から推定することができる。Fig.4.4 に被写体の撮像素素数と撮影距離の関係の模式図を示す。

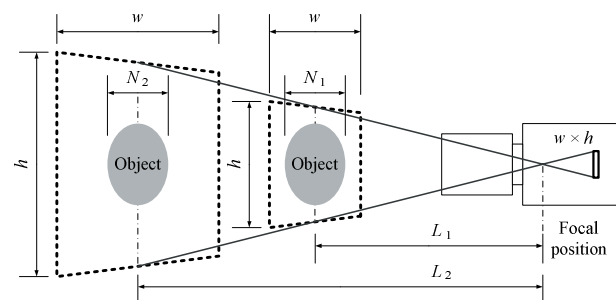


Fig.4.4 Relationship between number of shot pixels and shooting distance of object.

4.2.2 キャリブレーションによる光学系の同定

水槽試験機に搭載した画像処理専用カメラは $w \times h$ が 640×480 画素の USB カメラである。ここではまず、このカメラの光学系について気中および水中でのキャリブレーションを実施し、「撮影距離 L 」、「撮影画素数 N 」、「実寸 D 」の関連付けを行った。具体的には、撮影距離 200mm から 1000mm の間で 50mm ごとに直径 100mm の円を撮影してその直径に相当する画素数から 1mm 相当の画素数を算出し、その逆数と「撮影距離」の 1 次比例関係を利用して最小二乗近似によりパラメータを推定した^{40, 41)}。

Fig.4.5 に水槽試験機の画像処理専用カメラの水中キャリブレーションの実施状況を示し、その際に計測された実測値を Fig.4.6 に示す。

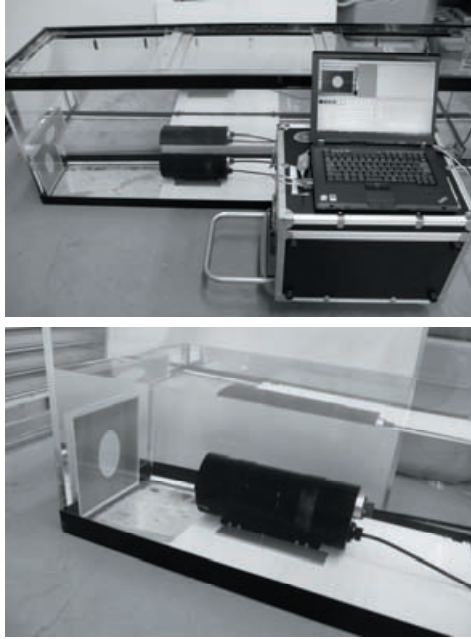


Fig.4.5 Underwater calibration for optical system of image processing camera of tank test model.

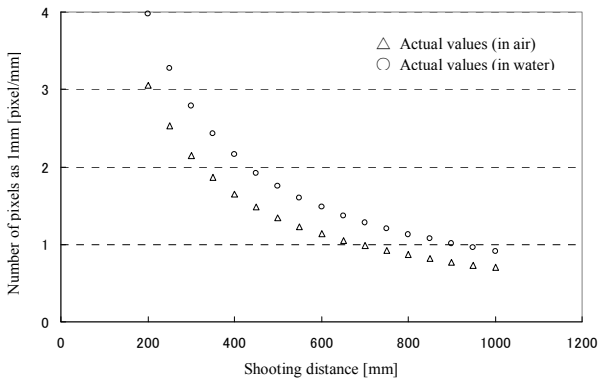


Fig.4.6 Plot of shooting distance vs number of shot pixels as actual size of 1mm.

「撮影画素数 N 」の逆数と「撮影距離 L 」は一次の比例関係をとることから、式(4.1)に対して最小二乗近似を適用すると、気中と水中それぞれの a と b は式(4.2)に示すパラメータとして同定された。これらを用いた比例関係を Fig.4.7 に示す。

$$\begin{cases} a_{air} = 1.381224 \times 10^{-3} \\ b_{air} = 5.1780325 \times 10^{-2} \end{cases} \begin{cases} a_{water} = 1.049454 \times 10^{-3} \\ b_{water} = 4.5130513 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (4.2)$$

なお、画像計測に際しては、式(4.2)のパラメータと式(4.3)を利用して実寸を推定する。

$$D = N \cdot (aL + b) [\text{mm}] \quad (4.3)$$

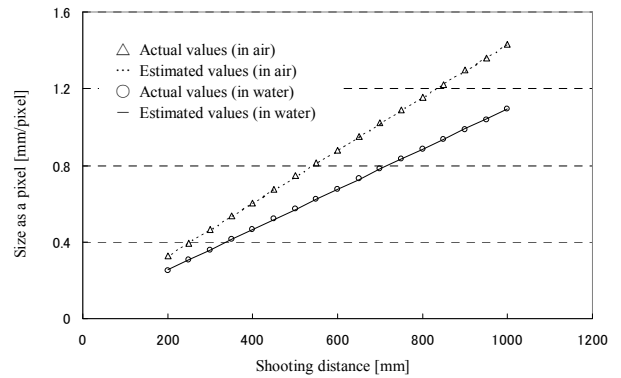


Fig.4.7 Least square estimation of optical system in the air and water.

4.3 GPS 波浪計の係留装置への生物の付着状況調査

GPS 波浪計への生物の付着状況については、設置海域が沖合であること、係留装置部の動きが激しいことから、Fig.4.8 に示すような東京湾の事例ほどではないと考えられる。しかしながら、太陽光が届く範囲については何らかの生物の付着が予想されたことから、沖合に設置後の GPS 波浪計の係留装置の現地調査を実施した[40]。



a) Raised buoy on the barge



b) Scraping of attached organisms

Fig.4.8 Appearance of attached organisms to ordinary lighted buoy in waterway of Tokyo Bay.

設置から一定期間経過したGPS波浪計の水中部の状況については、これまで確認されたことがなかったことから、主に索表面への生物の付着状況の確認を目的に、平成20年12月に設置から1年8ヶ月が経過した岩手県南部沖（釜石沖）のGPS波浪計の水中部の現地調査を実施した。

ここでは東北地方整備局の「みずなぎ」を母船とし、汎用の小型 ROV を利用して GPS 波浪計の水中部の撮影を試みた。

Fig.4.9 に調査時に使用した母船と ROV を示す。



a) Mother ship "Mizunagi"



b) Ordinary small ROV "Delta150"

Fig.4.9 Major equipments in the case of taking pictures underwater.

調査の際、今回の調査のために現地に持ち込んだ汎用の小型 ROV では対応できない程度の流速（北北東から約 1.5kt）が確認されたため、ROV に補助ロープと錘を取り付け、GPS 波浪計上の作業員によるサポートを伴ってその水中部の撮影を実施した。なお、調査時の波高は約 0.8m であった。Fig.4.10 にその調査状況を示す。



a) ROV which goes upstream against the current



b) diving and taking picture with auxiliary rope

Fig.4.10 Appearance of taking pictures underwater.

Fig.4.11 および Fig.4.12 に撮影した水中映像から取り出した浮体部と係留索の水中部の状況を示す。Fig.4.11 は浮体部、Fig.4.12 は係留索への生物の付着状況である。

これらの画像から、まず浮体本体部に大量の付着生物を確認することができた。一方、係留索については水深が増すにつれて付着生物が著しく減少してゆき、全ての水深で索の外形が確認できるだけの金属表面の露出を確認することができた。

以上の結果から、これらの生物の付着状況は画像計測による索の残存量の推定を妨げるものではなく、目的の作業に大きな支障を及ぼすことはないと考えられる。

一方、浮体の裏側には付着していた生物が大量に剥離したと思われる痕跡を確認した (Fig.4.13)。厳しい海象条件の影響も考えられるが、一定の付着量を超えると自重で自然剥離することも予想される。

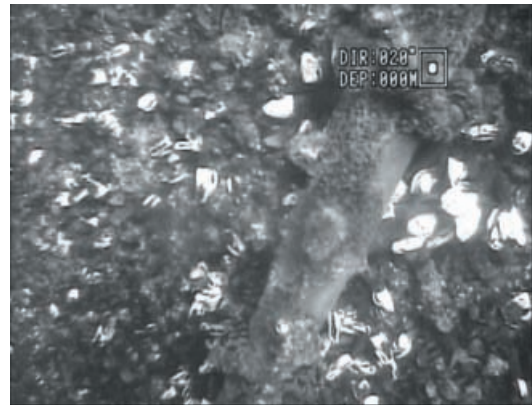


Fig.4.11 Appearance of attached organisms to the floating body.



Fig.4.12 Appearance of attached organisms to the chain.

4.4 水槽試験機の開発

水槽試験機的主要なシステム構成は、水中で点検作業を行う「水中ビークル」、取得画像からターゲットを捕捉しその位置を算出する「画像処理用 PC」、遠隔操作と自律制御の重ね合わせを行う「制御用 PC」で構成されている。

Fig.4.14 に水槽試験機のシステム構成を示す⁴¹⁾。

「水中ビークル」部は市販の小型 ROV をベースとし、その操作系に「制御用 PC」を割り込ませる形で種々の拡張機能を実現している。

また、「画像処理用 PC」は「水中ビークル」から送られてくる画像を逐次処理し、その処理結果のみを「制御用 PC」に渡している。このことにより、大きな計算負荷である画像処理が、制御のリアルタイム性に影響することはない。

Fig.4.15 に水槽試験機の構成要素の一部である画像処理用 PC (中央) と制御用 PC (右) を示す。

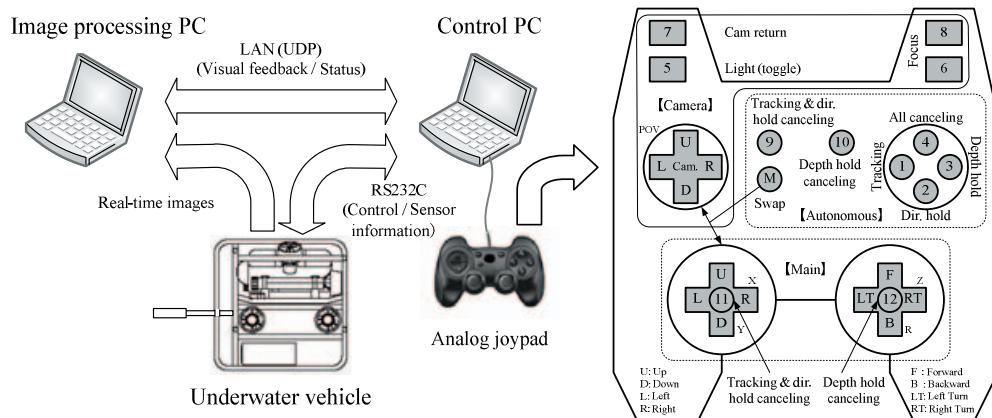


Fig.4.14 System configuration of tank test model.

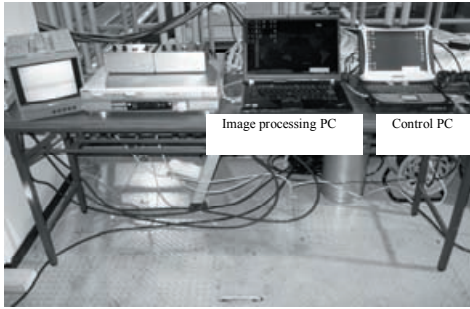


Fig.4.15 Image processing PC and control PC.

4.4.1 水中ビークル

水中ビークル部は、市販の小型 ROV 「Delta150 (キュー・アイ製)」に艀装を施すことで構成されている。ベースとした ROV は前方カメラと、水平スラスト 2 基、斜めに配した垂直スラスト 2 基を有する 4 自由度 (前後、左右、回転、上下) の ROV である。なお、本機は前方カメラ方向への移動を主としていることから、横移動は斜めに配した垂直スラストの差動により限定的な推力を確保したものであった。

ここでは任意方向の並進運動の性能向上のために独立したサイドスラスト 2 基を増設するとともに、前方カメラとは独立の画像処理専用のカメラを増設した。また、さすまた状の固定アームを装備し、これを点検対象物に押し当てて利用することで、撮影距離を一定に保つこととした。

Fig.4.16 に水槽試験機の水中ビークル部を示す。



a) Front view



b) Side view

Fig.4.16 Underwater vehicle part of tank test model equipped fixed-arm.

4.4.2 制御用 PC

制御用 PC 上では周辺装置との通信制御と水中ビークル自体の自律制御を司るソフトウェアを導入している。ここでの通信制御とは、水中ビークルからのセンサ情報、画像処理 PC からの対象物の位置情報等の受信、および水中ビークルへの操作指令の送信などである。

一方、自律制御は水中ビークルの水深計と磁気方位計に基づく深度制御と方位制御、画像処理 PC からの対象物の位置情報に基づく捕捉と追尾機能である。この自動追尾機能は主に水中ビークルのヨー制御により実現される。

ここで、ビークルの基本的な運動制御と画像処理は、それぞれ異なる周期でプログラムが動作している。基本的な運動制御の周期は 25msec であり、対象物の自動追尾のための画像処理の計算周期は 100ms である。その結果、深度保持や方位保持、自動追尾の制御自体は 25msec 周期で実行されるが、自動追尾の目標位置は 100ms ごとに更新されている。

Fig.4.17 に補償器を含むビークル部のヨー運動の制御系を示す。

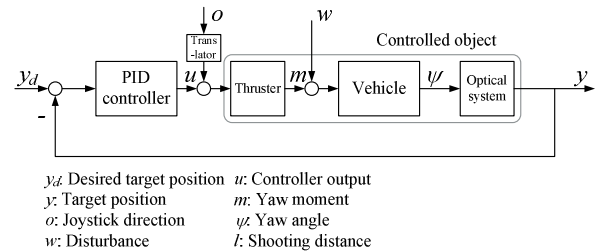


Fig.4.17 Yawing control system for target tracking using visual feedback information.

ヨー運動の制御では、前後スラストの差動は利用せず、サイドスラストの差動のみを利用する。ヨー運動指令と左右の横行動作指令が重畳された場合はそれぞれの指令値を単純加算し、各指令値の和がスラストの許容値を超えた場合には飽和处理される。

なお、システム上ではヨー運動の補償は PID 補償器で実施することとしているが、ヨー運動に対する明らかな定常偏差が存在しないことから、ここでは積分ゲインを 0 として、PID 補償器は次式で示す PD 補償器と等価となっている。

$$u = K_p (y_d - y) + K_D (\dot{y}_d - \dot{y}), \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} u : \text{Control output} \\ y_d : \text{Desire value} \\ y : \text{Present value} \\ K_p : \text{Proportional gain} \\ K_D : \text{Derivative gain} \end{cases}$$

また、水中ビークルの運動状態をオペレータに提示するナビゲーション画面を用意した。ここで提示される運動状態は、磁気方位計、ジャイロ、加速度計などのセンサ情報と推定値を利用して描画されるものである。なお、現状で搭載されているセンサ情報のみでは位置の累積誤差をキャンセルできないことから、測位用途には用いていない。

Fig.4.18 に制御用 PC ソフトウェアの実行画面を示す。

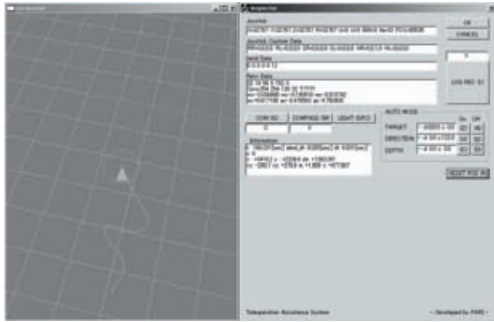


Fig.4.18 Execution screen of the control PC software.

4.4.3 画像処理用 PC

画像処理用 PC は、取得した画像を逐次表示すると同時に、画像を解析して点検対象物を抽出し、その画面内での位置情報を算出してそれを制御用 PC へ送信することが主な役割である。

対象物の抽出方法として、色情報を利用する方法と、輪郭情報を利用する方法の 2 種類を導入した。色情報を利用する方法では照度変化を考慮して色相情報を利用して対象を認識するものであり、距離変化による色情報の変化が少ない用途に適用可能である。一方、輪郭情報を利用する方法では画像中で対象物のコントラストが設定した閾値以上に確保されている限りにおいて、色情報の変化の影響をほとんど受けることなく、対象物の追尾が可能である。そこで次章以降に示す試験では、全て輪郭情報を利用して対象物の認識を試みた。なお、ここでのアプリケーションは Microsoft Visual C++ 上から MVTec HALCON の画像処理ライブラリを利用して構築した。

なお、ソフトウェアのダイアログ上には画像の記録ボタンを配置し、これを押下することで日付と時刻のファイル名を付けた画像ファイルを記録する。画像計測はオフラインでこの画像を利用して行う。

Fig.4.19 に対象物を認識中の画像処理用 PC ソフトウェアの実行画面を示す。

画像中の細かな縁取りラインがプロブ解析によって抽出された局所的な輪郭情報である。これら各々の輪郭情報だけでは対象物の位置を正確に示せないことから、これらの集合を 1 つの領域として取り扱うことで対象物の

発見を試みた。自動捕捉や追尾の際はこの領域の重心位置を常に撮影画像の中心に来るように水中ビークルのヨー運動を制御することとした。



Fig.4.19 Execution screen of the image processing PC software.

4.5 水槽試験

これまでに示したシステムを利用して、浮体模型による模擬点検作業試験を（独）港湾空港技術研究所の水中作業環境再現水槽で実施した。

4.5.1 水中作業環境再現水槽

実験は（独）港湾空港技術研究所の水中作業環境再現水槽を利用した。この水槽は 2004 年度から 2005 年度までの二カ年度にわたり整備された実験施設であり、種々の水中作業実験を行うための施設である。

水槽の特徴として、まず水槽内に W10m×L30m×D6m の実験空間を確保することで、縮尺模型の製作が困難な水中ロボット等を実機レベルで投入可能だけでなく、水槽底面や壁面を耐力構造とすることで、クレーンが許容する重量 10t までの建設機械や重機についても実機レベルで水槽内に投入可能となっていることが挙げられる。

加えて本水槽は、水槽壁面および底面に設けられた埋め込みボルトや臍穴を利用して構造物等の模型を水槽内に容易に設置可能であり、種々の水中作業対象を再現可能である。また、水槽の水深、波高、波長をそれぞれ独立して設定可能であり、種々の自然条件を再現可能である。これらを組み合わせて水槽内に種々の水中作業の現場環境を再現可能であることは、もうひとつの大きな特徴である。

これらの結果、水槽内に再現された水中作業の現場環境に実機レベルの水中作業機械や水中ロボットを投入することで実環境に極めて近い水槽実験が実施可能となり、本水槽は種々の環境下での水中作業機械の作業特性や性能を検証することができる実験施設となっている。

Table 4.1 に実験水槽の主な仕様と特徴を示す。

Table 4.1 Specifications of simulation tank for underwater working environment.

Items	Specifications / Performances
Dimension	<ul style="list-style-type: none"> • W10m×L30m×D6m. • Between the water levels of 1 to 6m.
Wave generation	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum height of 0.5m. • Between the periods of 0.7 to 2.4sec.
Bridges & Cranes	<ul style="list-style-type: none"> • 1 motored bridge, and 2 non-powered bridges. • 10t and 1t gate type cranes on the floor. • 0.25t gib crane on the bridge on the motored bridge.
Cameras	<ul style="list-style-type: none"> • 3 underwater cameras (One is under the bridge. Other two are on the opposite inside walls). • A ROV equipped.
Others	<ul style="list-style-type: none"> • It is possible to install various structures using pre-planned stud holes on the inside walls and slots of the bottom. • The bottom is bearing floor up to 10t/m². • A backhoe type universal underwater excavator equipped (Weight 4t / Slewing radius 5.2m). • 0.5m square grids are drawn on the odd side wall and bottom.

Fig.4.20 に水中作業環境再現水槽の概観を示す。また、**Fig.4.21** に水槽の利用事例を示す。

ここで、**Fig.4.21 a)**は第3章の自動汀線測量システムの水中ロボット部の動作確認試験の様子である。ここでは水深を1mに設定して無線LANのアンテナロッドのみを水面上に露出して歩行実験を行っている。**Fig.4.21 b)**は遠隔操作型水中バックホウの手先に取り付けた非接触鋼管肉厚計測装置を用いて、水槽内に設置した栈橋模型鋼管杭の肉厚計測実験の様子である⁴²⁾。

4.5.2 点検対象物

浮体模型は、市販のフロートからなる浮体部、規格チェーン二種類（線径50mmおよび40mm）とシャックル一種類からなる索で構成されており、鎖の線径は実物の約1/2に相当するものである。なお、この模擬点検作業試験における点検対象物は、これらの二種類に規格チェーンのリンク部の寸法である。

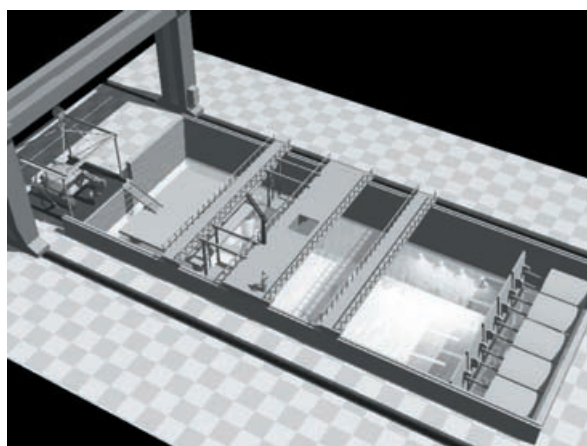
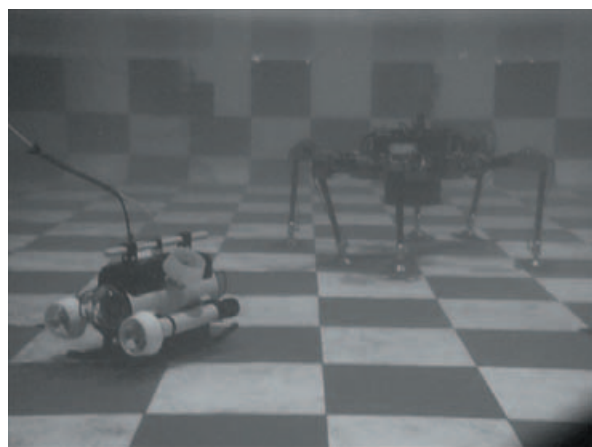


Fig.4.20 Simulation tank for underwater working environment.



a) Autonomous underwater walking robot (water level; 1m)



b) Test of contactless thickness measurement system equipped on a teleoperated underwater backhoe (water level; 6m)

Fig.4.21 Examples of utility of the tank.

Fig.4.22 係留装置を有する浮体模型を示す.

ここでは、「点検対象物(索)の発見と捕捉による遠隔操作補助」、「索の画像撮影」、「画像計測による索の実寸推定」までの一連の作業を模擬点検作業試験として実施するとともに、造波による外乱条件下における対象物の捕捉試験を実施した。

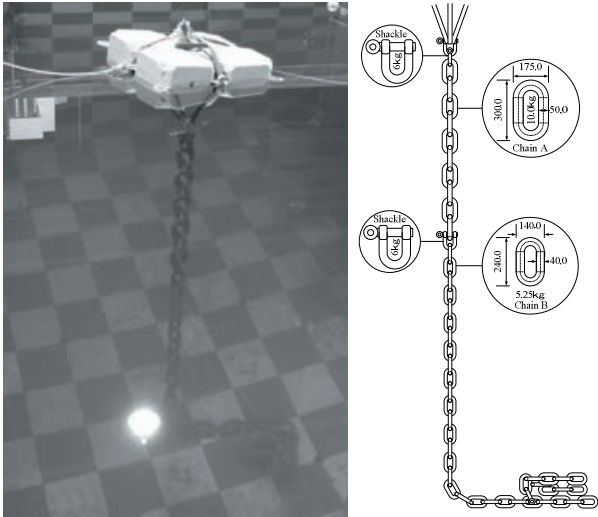


Fig.4.22 A model buoy for mimic maintenance examination.

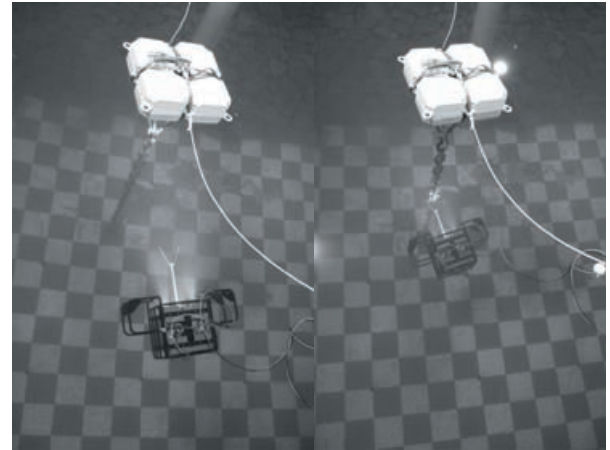
4.5.3 模擬点検作業試験

水中作業環境再現水槽において、「索の発見と捕捉による遠隔操作補助」、「索の画像撮影」、「画像計測による索の実寸推定」までの一連の点検作業を想定した模擬点検作業を実施した。実験時の水深は 6.0m である。

Fig.4.23 に点検対象物を発見し、それを捕捉しながら対象物に接近してゆく水中ビークルの様子を示す。

水中ビークルはターゲットである点検対象物を発見す

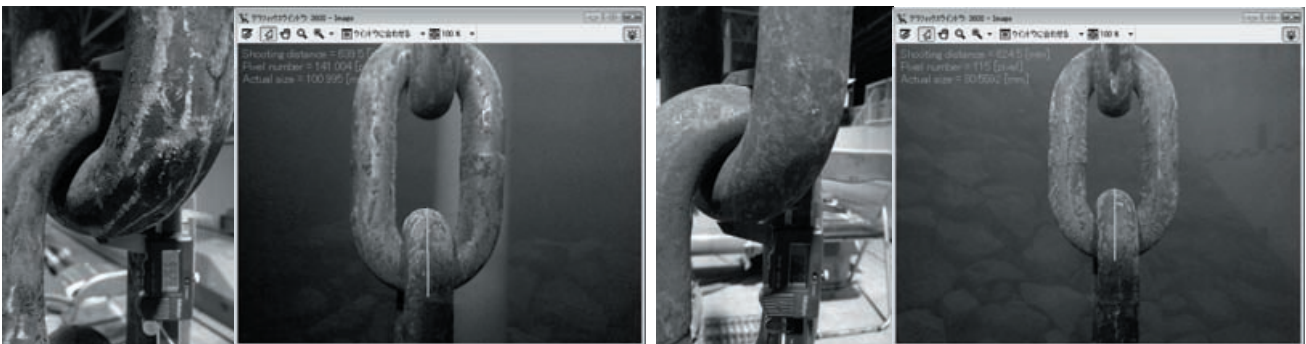
ると、前章で述べたようにその重心位置を画像の中心で捕らえ続けるようヨー運動の自律制御を開始する。このヨー運動の制御量は操作装置からの遠隔操作量との重ね合わせで生成される。このため、自律制御中であってもオペレータの操作は一定量反映可能であり、非常時にはオペレータの判断で緊急回避等の操作が可能である。



a) Approach
b) Taking picture
for image measurement

Fig.4.23 Approaching to the chain and taking picture using target tracking function.

水中ビークルが点検対象物に到達した後は、微小な推力でアームの先端を点検対象物に押し当て続け、この間の点検対象物とカメラ間の距離は一定のため、ここで寸法計測用の画像を撮影し記録した。その後、ここで撮影した画像をオフラインで利用し、画像計測アプリケーション上で画素数をカウントして式(4.4)の推定式に代入す



a) Actual size 99.28mm

(at the representing point of large link 50mm×2)

Estimated size 100.995mm (Shooting distance 639.5mm)

b) Actual size 80.59mm

(at the representing point of large link 40mm×2)

Estimated size 80.5592mm (Shooting distance 624.5mm)

Fig.4.24 Estimation results of actual size of link chains by image measurement.

ることによって点検対象物の実寸を推定した⁴⁾。

本手法で推定を試みた結果、誤差は線径 50mm の鎖のリンク部で+1.715mm、線径 40mm の鎖のリンク部で-0.0308mm であった。ここで画像計測等の画像処理専用カメラとして適用した USB カメラの解像度 (640×480) と対象物の大きさを考慮すれば十分な精度を有していると判断できる。

Fig.4.24 に線径 50mm の鎖のリンク部と線径 40mm の鎖のリンク部それぞれの実寸を取得画像から推定した結果を示す。

4.5.4 外乱環境下における光学誘導による点検対象物の追尾

水中作業環境再現水槽において、水深 6.0m, 周期 2.4sec, 波高 0.1m の波浪環境下での点検対象物である係留装置の捕捉と自動追尾試験を実施した。ここでは画像計測用に水中ビークルに搭載した画像処理専用カメラからリアルタイムに取得する水中画像を利用して、光学誘導による対象物の補正とその重心位置の自動追尾を行った。

4.4 節で述べたとおり、水中ビークルの自動追尾機能は点検対象物の重心位置を常に画像計測用カメラの中心で捕らえ続けるようそのヨー運動を制御するものである。そしてそのヨー運動は水中ビークルの前後に配された 2 基のサイドスラストの差動動作により実現される。よってここでは、自動追尾中の点検対象物の取得画像上での横位置と、サイドスラストの制御出力を記録してその効果を確認した。

なお、画像処理専用カメラの横方向解像度は 640 画素であり、その中心位置は 320 画素の位置であることから、自動追尾中はこの中心位置の近傍で点検対象物の重心位置を捕らえることとなる。また、本実験では観測開始から約 10sec 経過後に光学誘導を開始した。

Fig.4.25 に点検対象物の自動追尾の結果として記録されたその横位置を示し、**Fig.4.26** にその際のサイドスラストの制御出力を示す。

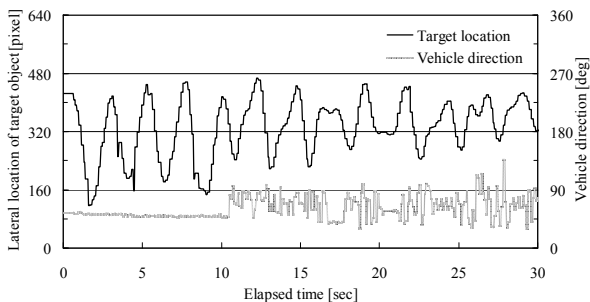


Fig. 4.25 Decrease in amplitude of on-screen lateral location of the target object by optical navigation.

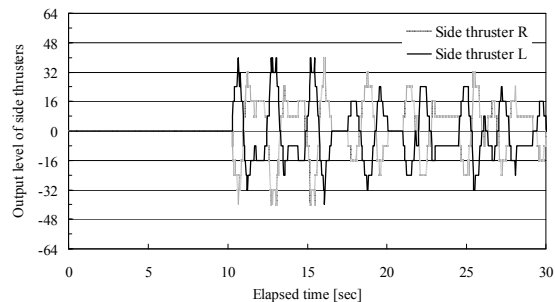


Fig.4.26 Output level of Side thrusters.

これらの図から、光学誘導を開始した約 10sec を境に水中ビークルのサイドスラストの差動動作が開始され、水中ビークルの方位が変化し始めたことがわかる。その結果として、光学誘導開始後は画面上における点検対象物の横位置の振幅が減少傾向にあることが読み取れる。

Table 4.2 と **Fig.4.27** に取得画像上における点検対象物の横位置の振幅変化を示す。

Table 4.2 Amplitude of target location.

	Uncontrolled state	Controlled state	
		Transition state	Stable state
	305.866508	268.97963	192.737839
	300.040611	173.07901	162.796524
	260.320374	224.485748	114.887695
	290.739197	249.791931	180.279693
	263.171005	198.644623	139.296753
	271.135452		132.758026
	310.14534		200.733078
			159.169877
			134.652192
			152.826813
			128.116272
			132.64563
Average	285.9169	222.9962	152.575

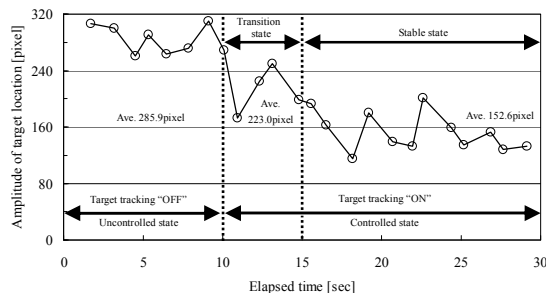


Fig.4.27 Changing amplitude of on-screen lateral location of the target object by optical navigation.

これらの表と図から、光学誘導による自動追尾機能 OFF の状態では、点検対象物の画面上での平均振幅は 285.9pixel であった。それに比較して、観測開始から約

10sec 経過後に自動追尾機能 ON としてさらに約 5sec の遷移状態を経た後、つまり観測開始から 15sec 以降の安定状態においては、その平均振幅は 152.6pixel となった。この結果、点検対象物の画面上での振幅は自動追尾機能によって 53.4%まで減少したこととなり、これにより光学誘導による点検対象物の自動追尾機能の効果を確認することができた。

また、同様の水深 6m、周期 2.4sec、波高 0.1m の外乱条件下において、対象物の捕捉と自動追尾に加えて、点検対象物まで接近してさすまた状の固定アームを点検対象物である係留索に押し当てる擬似ミッションを試みた⁴⁾。

Fig.4.28 に、当該外乱環境下において点検対象物を捕捉し、索を追尾しながら対象物まで到達してアームを索に押し当てる水中ビークルの様子を示す。この結果から、このような外乱環境下であっても対象物を捕捉して追尾し続けながら点検対象物まで到達できることを確認した。



Fig.4.28 Appearance of the target capturing and vehicle navigation under the wave condition.

4.6 作業条件および点検システムの仕様の検討

各地方の設置場所ごとに諸条件が大きく異なることから、ここでは先行する東北地方整備局の GPS 波浪計を主たるターゲットとして、点検システムの仕様を決定した。また、点検対象とする係留索の種別は寸法計測が作業の主となる鎖型とし、概観確認が主となるワイヤー型は含まないこととした。

4.6.1 対応潮流

Table 4.3 に GPS 波浪計の設置場所および設計の諸条件の一覧を示す。

当該点検システムは、東北地方での運用を第一の目的としていることから、点検システムの運用を想定している夏季 (2008 年 6 月 1 日から 8 月 31 日) 3 ヶ月間にわたって、岩手県宮古沖の「岩手中部沖 GPS 波浪計 (No.804 ブイ)」と青森県八戸沖の「青森東岸南部沖 GPS 波浪計 (No.805 ブイ)」に設置された流速計の膨大な観測データを 5 秒毎に間引いて収集し、各流速値の出現頻度を調べた。

Fig.4.29 および **Fig.4.30** に当該調査期間中の No.804 ブイと No.805 ブイ周辺の最大流速と平均流速を示す。

開発する点検システムが対応可能な流速を、現場海域で発生しうるいかなる流速値よりも大きな値に設定すれば、流況に左右されない点検システムとすることができる。しかしながら、安易な対応流速の増大は悪戯に点検システムの消費電力の増加や機器全体の大型化につながり、コストや運用性の観点から好ましくない。よって、ここでは発生しうる流速の最大値だけではなく、その出現頻度も考慮して適切に点検システムの対応流速を設定することとした。

まず、最大流速の半分程度の流速の発生頻度を前図から読み取ると、調査期間 92 日間のうち 75cm/sec 以上の流速が発生した日数は、宮古沖の No.804 ブイ周辺では 83 日 (90.2%)、八戸沖の No.805 ブイ周辺では 47 日 (51.1%) であった。また、100cm/sec 以上の流速が発生した日数は、宮古沖の 804 ブイ周辺では 51 日 (55.4%)、八戸沖の 805 ブイ周辺では 20 日 (21.7%) であった。また、調査期間中の最大流速のピークは宮古沖の No.804 ブイ周辺では 8 月 18 (198cm/sec) であり、八戸沖の No.805 ブイ周辺では 6 月 24 日 (149cm/sec) であった。

Fig.4.31 に、それぞれのブイ周辺で調査期間中最大の流速を観測した当日の各流速値の出現頻度を示す。

Table 4.3 Point of installation of the GPS wave meters and the design conditions (including plan).

Design condition \ Point (Offing)	Tohoku Regional Development Bureau					Chubu Regional Development Bureau		Kinki	Shikoku
	South part of Iwate	Central part of Miyagi	South part of east coast of Aomori	Central part of Iwate	North part of Miyagi	Shizuoka	Mie	Wakayama	West part of Kochi
Depth	204m	144m	80m	170m	160m	30m	200m	200m	300m
Geology	Sandiness	Sandiness	Sandiness	Sandiness	Sandiness	Sandiness	Mud or sandy mud	Sandiness	Sandiness
10min Average wind velocity	60.0m/s	60.0m/s	60.0m/s	60.0m/s	60.0m/s	60.0m/s	60.0m/s	60.0m/s	60.0m/s
Current speed • Design current	1.34m/s	1.54m/s	1.75m/s	1.34m/s	1.54m/s	2.31m/s	2.88m/s	1.5m/s	2.6m/s
	2.6kt	3.0kt	3.4kt	2.6kt	3.0kt	4.5kt	5.6kt	2.9kt	5.1kt
Average current • J-DOSS	0.11m/s	0.12m/s	0.12m/s	0.11m/s	0.12m/s	0.12m/s	0.32m/s	0.45m/s	0.60m/s
	0.2kt	0.2kt	0.2kt	0.2kt	0.2kt	0.2kt	0.6kt	0.9kt	1.2kt
Communication distance Power	17.3km	15.2km	-	-	-	21.5km	11km	17km	17km
	10W	10W	-	-	-	10W	10W	10W	10W
Altitude of land station	about 120m	about 170m	about 30m	about 50m	about 50m	about 40m	about 450m	about 30m	about 30m

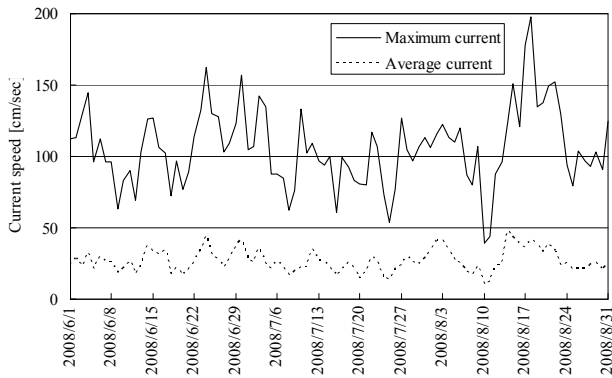


Fig.4.29 Maximum current speed around the No.804 buoy in summer time.

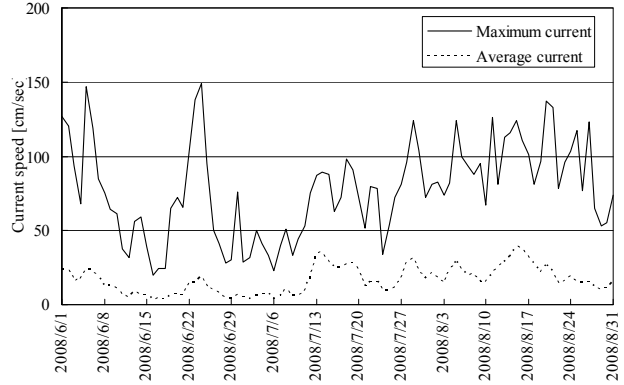
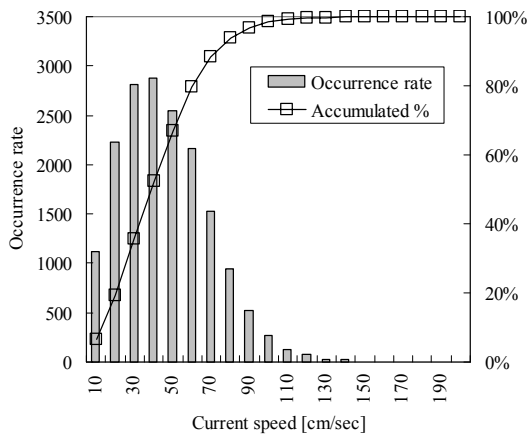
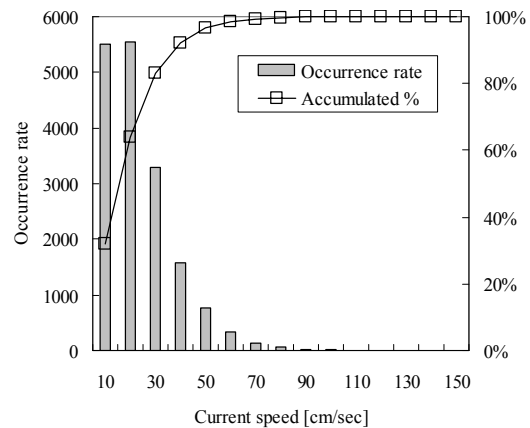


Fig.4.30 Maximum current speed around the No.805 buoy in summer time.



a) Offing of Miyako, Iwate: No.804 (2008.8.18)

Max. 198cm/sec, Ave. 41.8cm/sec



b) Offing of Hachinohe: No.805 (2008.6.24)

Max. 149cm/sec, Ave. 18.9cm/sec

Fig.4.31 Occurrence rate of each current in observational days of peek of maximum current.

宮古沖の No.804 ブイ周辺において調査期間中最大の流速を観測した 8 月 18 日の 75cm/sec 以上の流速の累積出現頻度は全体の 8.52%であり、100cm/sec 以上では全体の 1.58%であった。一方、八戸沖の No.805 ブイ周辺において調査期間中最大の流速を観測した 6 月 24 日の 75cm/sec 以上の流速の累積出現頻度は全体の 0.42%であり、100cm/sec 以上では高々0.05%であった。これらの流速値は動揺補正をかけられていない生データではあるが、当該流況調査の期間中、最も流況の厳しい日であっても 100cm/sec を超える流速はその日の数%程度しか発生しておらず、その出現頻度を時間に換算すると、8 月 18 日の宮古沖の No.804 ブイ周辺でのべ 22 分 40 秒、6 月 24 日の八戸沖の No.805 ブイ周辺でのべ 45 秒であり、1 日に作業可能な時間と比して十分短い (Table 4.4)。結果として、100cm/sec 以上の流速の出現頻度は極めて少なく、実用上その流速域を考慮する必要はないといえる。

以上の結果から、今回のケースでは現場海域で発生しうる最大流速の半分程度の速力、すなわち 100cm/sec 程度の速力を点検システムの水中ビークル部が具備することで実用上支障のない運用が可能であると考えられる。したがって、当該点検システムの最大前進速力は 100cm/sec に 10%程度の余裕を加えて 110cm/sec と設定し、通常は流速 75cm/sec 以下の流況下で運用することとした。なお、点検作業の際は母船を GPS 波浪計に係留することから、母船は必ず流れの下流側に位置することとなる。結果として、点検システムも必ず流れの下流側から上流に向かって係留索にアプローチすることから、真横から潮流を大きな流れを受ける運用方法は想定しないこととした。

Table 4.4 Occurrence rates of some currents and the times on the day of peek of maximum current.

Area	Offing of Miyako: No.804 (2008.8.18) Max.198cm/sec, Ave.41.8cm/sec	Offing of Hachinohe: No.805 (2008.6.24) Max.149cm/sec, Ave.18.9cm/sec
Current speed		
Over 75 cm/sec	8.52% (02h02m41s/24h00m00s)	0.42% (00h06m03s/24h00m00s)
Over 100 cm/sec	1.58% (00h22m40s/24h00m00s)	0.05% (00h00m45s/24h00m00s)

4.6.2 波浪条件

点検システムが作業を行う水中では波浪の影響は皆無であるが、海上の母船には大きな影響を及ぼすことが想定され、当該点検作業の波浪に起因する作業限界は母船側の作業限界によって決定されることとなる。ここでの

対応波高は母船の作業限界、あるいは船上の人間の作業限界を目安とし、波高 1.0m をその限界と設定した。

ただし、作業の実施や継続の可否は、降雨、視程、風速等も考慮して、現場海域の状況から総合的に判断することとする。

4.6.3 作業水深

点検作業を行う水深は主に数十 m 以浅となるが、設置海域は水深 200m 程度である。設置海域の水深や将来の点検範囲や対象の拡大を想定すれば、点検システムが具備すべき潜水能力は 200m 程度が妥当である。

4.6.4 点検システムの質量

カメラのみを有する 200m 級の一般的な ROV の水中ビークル部は少なくとも数十 kg 程度の質量を有し、付加装備を有する本点検システムはさらなる質量の増加は避けられない。ここでは監督船や交通船など比較的小型の船舶での点検システムの運用を想定し、水中ビークル部の質量を 100kg 程度に設定するものとした。ただし、水中ビークル部が 50kg を超えた時点で人力のみによる安全な投入・揚収作業はほぼ不可能であると判断し、簡易なクレーンやダビッドなどの装備が必要である。

なお、船上装置を含む点検システムの各構成要素は、人力で母船に積み込めるよう可能な限り軽量なもので構成するものとし、重量物は 50kg 程度以下に分離できることが望ましい。

4.6.5 実海域試験機の構成

これまでの試験結果および調査結果に基づき、遠隔操作と自律制御の複合操作系および画像計測機能と光学誘導機能を有する係留装置点検システムの実海域試験機の構成を決定した。

Fig.4.32 と Table 4.5 に実海域試験機の主要な構成を示す。

実海域試験機の水中ビークル部には、水槽試験機と同様に操縦用カメラが搭載されると同時に画像計測用カメラが搭載され、その撮影距離を一定に保持するためのさすまた状アームも装備される。水槽試験機との主な相違点としては、画像計測用カメラに昇降機構が付加されて撮影位置の微調整が可能となっているほか、さすまた状アームに伸縮機構が付加されて航行時にはその妨げとならないようフレームの内側にアームを格納可能となっている。

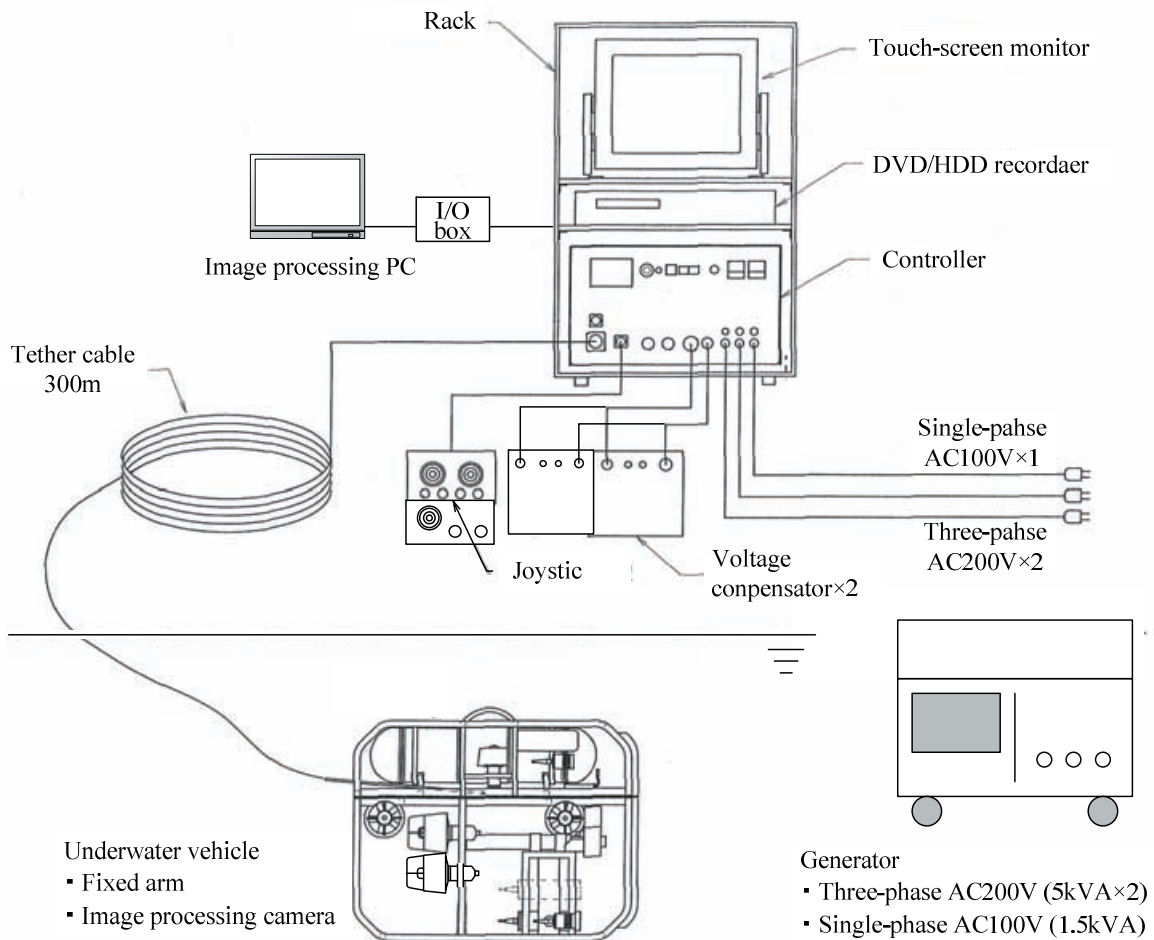


Fig.4.32 System configuration of practical trial model under development.

Table 4.5 Key components of practical trial model.

Item	Dimension [m] (notes)	Mass [kg]	No. of pcs
Vehicle	1.35L×0.7W×1.05H Thrusters Horizontal:400W×6 Vertical :200W×2	120	1
Tether cable	300	55	1
Rack	0.7L×0.6W×0.95H	60	1
Voltage compensator	0.7L×0.5W×0.5H	40	2
Joystick1(Upper)	For thruster operation	2.1	1
Joystick2(Lower)	For camera operation	2	1
Image processing PC	Laptop PC base	5 (Including I/O box)	1
Generator	3phaseAC200V25A×2 + AC100V15A	90×2+20	1

4.6.6 実海域試験機における光学系のキャリブレーション機構

水槽試験機では、事前に実施した光学系のキャリブレーション結果を用いて、一連の画像計測試験を実施した。これは日々の水槽内の水温変化が小さく、また水質も真水であったため、屈折率の変化はほとんど生じないと判断したためである。しかしながら、実際の海域では場所の変化だけでなく日々の塩分濃度や海水温度などの差異によって調査の度に屈折率が異なる可能性がある。

そこで実海域試験機においては、調査ごとに容易に光学系の再キャリブレーションを実施可能な機能を装備する予定である。これは実海域試験機のさすまた状アームのリスト部にキャリブレーションターゲットを設置し、アームの格納のための伸縮機構を利用して容易に再キャリブレーションを実現するものである。なお、運用時のキャリブレーションターゲットは画像計測用カメラの画角外にあることから、キャリブレーションは画像計測用カメラを昇降機構で最上位に位置して行う。

また、新規に設置する GPS 波浪計については、係留装置の計測予定部位にあらかじめ基準長を記したマーカを描いておく方法も考えられる。

4.6.7 人の操作が画像計測結果に及ぼす影響についての考察

点検システムはさすまた状アームを係留索に押し当てることで撮影距離を一定に保つことから、その接触状態は画像計測結果に少なからず影響を及ぼす。ここでは係留索と正対する画像計測用カメラに加えて、パンチルト機構を持った操縦用カメラも併用して複数の視点からその接触状態を確認しながらアームを押し当てることで、係留索との適正な接触状態を確保する。しかしながら、係留索への付着生物が著しく多い場合には接触状態だけでは解決できないことから、付着生物の除去技術が別途必要となる。なお、画像計測用カメラの画角を小さくしたり、あるいは撮影距離を長く取ることで、撮影距離の変化に対する画像計測結果の感度は鈍くなり、撮影距離の誤差が計測結果へ及ぼす影響を低減できる。

また、水槽試験機を利用した画像計測試験では、計測部位の指定はオペレータがマウスを利用して手動で指定した。このことから、オペレータや計測タイミングが異なることで画像計測の結果にばらつきが生じることは否めない。当面は実海域試験機においても、計測部位の指定はオペレータがマウスを利用して手動で指定することとするが、将来的には計測部位を取得画像から自動で探索する機能を付加し、画像計測結果のばらつきの低減を図る。

4.7 提案手法の導入効果に関する考察

これまでに GPS 波浪計の係留装置の点検作業は実施された実績がないことから、ここでは考えられる既存の点検作業方法と比較して提案手法の導入効果を考察する。

実施可能な既存の点検作業方法としては、現場海域で作業台船上に GPS 波浪計を陸揚げする方法が挙げられる。この場合、約 40t の GPS 波浪計の浮体部とそれ以上の重さを有する係留装置部を陸揚げすることが可能な規模の起重機付作業台船が必要であり、さらにその運用には押船、揚錨船、警戒船などが必要となる。

一方、提案手法では 200kg 以上の揚荷能力を有するダビットもしくはクレーンを装備した 30t 程度の母船 1 隻が必要であり、7 名程度の船員と作業員で作業を行うことを想定している。

よって、実施可能な既存の点検作業手法の 1 日あたりの備船費用は、船舶の種類とその数量、規模の違いから提案手法のそれと比較して明らかに高く、安く見積もっても提案手法の数倍以上の備船費用が見込まれる。加えて、係留装置の点検作業を第一に想定する東北地方太平洋沿岸部では、海象による工事の休止率を勘案して 1 日の洋上作業に対して 3 日程度の作業日数を見込むことが許されている。

以上のことから、実施可能な既存の点検作業手法と比較して提案手法は費用の縮減は容易に予想できるが、この詳細な検討は繰り返し実施する実海域での運用試験を通して行う予定である。

5. 結論

本研究では、国土交通省港湾局が担務する海岸および港湾整備事業にかかる、① 浸食海岸の汀線測量作業、② 海洋浮体構造物の係留装置の点検作業、の二種類の作業について、それらの水中作業の無人化手法を提案し検証した。ここではいずれの課題についても、想定する現場の作業条件を考慮して試験機の仕様および性能を決定し、それらのプロトタイプを開発して現地と水槽にて作業試験を実施して提案手法の妥当性を検証した。

① 浸食海岸の汀線測量作業

人間に代わって海浜の干出部から水中部までの連続的な測量作業を実現することを目的として、自動汀線測量システムの現地試験機を構築し、現地試験を実施した。本研究で得られた主要な結果を以下に要約する。

1) 防水モジュール構造を採用した水陸両用型歩行ロボ

ットと自動追尾方トータルステーションで構成される自動汀線測量システムを構築した。

- 2) 地盤支持力を考慮した足部の設計手法を導入した。
- 3) 測線の計画から海浜の横断測量の実施、断面図やコーナー図の作成までの一連の作業を現地海岸で実施し、提案手法の妥当性を示した。
- 4) 汀線測量システムとして、必要十分な測量精度を確認した。

② 係留装置の点検作業

GPS 波浪計を陸揚げすることなく水中部無人でその係留索の点検作業を実現することを目的として、提案手法の水槽試験機を構築し、模擬作業試験を実施した。本研究で得られた主要な結果を以下に要約する。

- 1) 画像計測機能、光学誘導機能、および遠隔操作と自律制御を複合した操作系を有する係留装置点検システムの水槽試験機を構築した。
- 2) 水槽試験機を利用した模擬点検作業試験により、点検対象物の認識からその寸法計測までの一連の作業を水槽内で模擬的に再現し、提案手法の妥当性を示した。
- 3) 画像計測による鎖の線径の計測精度はカメラ性能、点検対象物の寸法を勘案すれば十分なものであった。
- 4) 光学誘導に基づく自律制御によって点検対象物の自動追尾機能を実現し、その観測画像の横振れ量の低減を図った。その結果、造波による外乱環境下においても点検対象物を捕捉可能であり、点検対象物まで容易にアプローチできることを示した。
- 5) 水槽試験や現地調査の結果から、作業条件や実海域試験機の主要な構成と仕様を設定した。特に、その前進速度については、運用を想定する海域の各流速値の出現頻度を加味して適切に設定した。

本研究の目的は、ここで取り上げた二種類の作業についての無人化手法を実現することと同時に、所定の環境条件下における特定の水中作業の無人化手法を実現する一連のプロセスをその具体例をもって示すことで、今後実施される同様の取り組みに資することである。

本研究の結果として得られた種々の成果は、ここで取り上げた二種類の作業についての無人化手法の妥当性を十分に示すものであり、いずれも実用機の製作に移行できる段階に到った。今後は本研究の成果を活用し、ここで採り上げた二種類の作業については次の研究開発段階へ移行して、実用に供しうる実機レベルの水中作業シス

テムの構築を目指す。

(2011年4月27日受付)

謝辞

本稿は著者の博士学位論文の書式を変更し、港湾空港技術研究所資料として発表するものである。

本論文を作成するにあたり、本研究の遂行に際してご指導、ご協力をいただいた全ての方々へ感謝致します。

まず、大阪大学大学院工学研究科教授、加藤直三先生には本論文を取まとめるに際しまして、終始暖かいご指導、多大なるご鞭撻を賜りました。ここに心より厚く感謝の意を表します。また、同工学研究科教授長谷川和彦先生、戸田保幸先生、同産業科学研究所教授八木康史先生、立命館大学理工学部ロボティクス学科教授川村貞夫先生には、本研究につきましても的確なご指摘と貴重なご意見を賜りました。深く感謝の意を表します。

そして、本論文を取りまとめる機会を頂き、広い見地から終始ご指導賜りました独立行政法人港湾空港技術研究所施工・制御技術部の白石哲也部長（現同所特別研究官）に厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行に際し、終始多大なるご指導、ご助言賜りました同施工・制御技術部計測・制御研究チームの吉江宗生リーダー（現同所新技術研究開発領域計測・システム研究チームリーダー）に厚く御礼申し上げます。そして、本研究にかかる試験装置の準備・製作や試験実施に際し、多大なるご支援とご協力を頂きました同施工・制御技術部計測・制御研究チームの平林丈嗣氏（現同所新技術研究開発領域計測・システム研究チーム研究官）に心より感謝致します。

また、研究活動の開始時から本研究の礎となる重要な基礎的技術や知見をご教示頂くとともに、多大なるご指導賜りました同所施工・制御技術部の元新技術研究官、秋園純一氏、ならびに元同所特別研究官の酒井浩氏に深く感謝致します。そして、終始暖かいご助言と多大なるご協力をいただきました同所施工・制御技術部（現新技術研究開発領域）の皆様へ心より感謝する次第です。

なお、本研究の主要な部分は国土交通省北陸地方整備局ならびに東北地方整備局からの受託研究として実施したものです。当該研究の機会を頂き、研究遂行に際して多大なるご支援、ご協力を賜りました各整備局の担当諸氏に深く感謝致します。

最後に本研究を行うに際しまして、格別のご配慮を頂きました小和田亮元理事長、ならびに金澤寛前理事長をはじめとする港湾空港技術研究所の皆様へ深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中央労働災害防止協会, “安全衛生年鑑平成 17 年版,” 2006.
- 2) <http://www.jaish.gr.jp/>
- 3) 田中敏成, “港湾分野における水中作業の無人化に向けた技術開発,” 計測と制御, 47 (10), 社団法人計測自動制御学会, pp.837-842, 2008.
- 4) T. Hirabayashi, T. Yamamoto, H. Yana, and H. Iwata, “Experiment on Teleoperation of Underwater Backhoe with Haptic Information,” *Proc. of ISARC2006*, pp.36-41, 2006.
- 5) 秋園純一, 田中敏成, 佐藤栄治, 剣持知浩, 中川勝栄, “歩行式水中調査ロボットによる海底面凹凸測定,” 土木学会海洋開発論文集, pp.67-79, 1997.
- 6) 田中敏成, “棧橋床版下部点検装置のための遠隔操作支援システムの提案,” ROBOMECH2009 講演論文集, pp.1P1A-17, 2009.
- 7) 広瀬茂男, 有川敬輔, “研究プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発,” 日本ロボット学会誌, 17, 2, pp.301-309, 1999.
- 8) T. Doi, R. Hodoshima, Y. Fukuda, S. Hirose, T. Okamoto, and J. Mori, “Development of Quadruped Walking Robot TITAN XI for Steep Slopes - Slope Map Generation and Map Information Application -,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, 18, 3, 318-324, 2006.
- 9) http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html
- 10) R. B. McGhee, “Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain,” *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.9, No.4, pp. 176-182, 1979.
- 11) S. M. Song and K. J. Waldron, *Machines that walk: The adaptive suspension vehicle*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- 12) D. Wettergreen, C. Thorpe, and W. L. Whittaker, “Exploring Mount Erebus by Walking Robot,” *International Conference of Intelligent Autonomous Systems*, pp.72-81, 1993.
- 13) <http://www.penta-ocean.co.jp/business/tech/civil/auto/pdf/futaba.pdf>
- 14) <http://www.penta-ocean.co.jp/business/tech/civil/auto/pdf/suteisi.pdf>
- 15) D. Yoerger, et al., “自律海底探査機エイブ (ABE :Autonomous Benthic Explorer) を用いた海底溶岩流の調査,” 海洋調査技術学会誌, Vol.9, No.1, pp.43-60, 1997.
- 16) 浦環ほか, 航行型海中ロボット「アールワン・ロボット」による手石海丘観測, 海洋調査技術, Vol.13, No.1, pp.11-25, 2001.
- 17) 浦環, “自律型海中ロボット r2D4 の製作と佐渡沖および黒石海丘海底観測,” 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, pp.709-713, 2004.
- 18) 小島淳一, 浅川賢一, 松本重貴, 加藤洋一, 大垣健一, 加藤直三, “海底ケーブル調査用自律走行式水中ロボットの研究開発,” 日本造船学会論文集, 第 188 号, pp.351-358, 2000.
- 19) 藤井輝夫ほか, “Development of a Versatile Test-Bed “Twin-Burger” toward Realization of Intelligent Behaviors of Autonomous Underwater Vehicles,” *Proc. OCEANS’93*, Vol.1, pp.186-192, 1993.
- 20) 近藤逸人ほか, “Development of an autonomous underwater vehicle “Tri-Dog” toward practical use in shallow water,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.13, No.2, pp.205-211, 2001.
- 21) 熊谷道夫, 浦環, 榊原孝志, 佐々木 学, “湖水観測水中ロボット「淡探」の開発—自律型水中ロボット (AUV) の仕様と運用成果報告—,” 建設の機械化, No. 614, pp.33-39, 2001.
- 22) 田中敏成, 酒井浩, 秋園純一, “歩行ロボットを用いた水陸境界域における地形測量作業の自動化のための基礎実験,” ROBOMECH’03 講演論文集, pp. 2A1-2F-24, 2003.
- 23) T. Tanaka, H. Sakai, and J. Akizono, “Design Concept of a Prototype Amphibious Walking Robot for Automated Shore Line Survey Work,” *Proc. of Oceans-Techno Ocean’04*, pp.T-D-2-4, 2004.
- 24) 田中敏成, “水陸両用型歩行ロボットを用いた自動汀線測量システム,” マリンエンジニアリング, Vol.43, No.4, 社団法人日本マリンエンジニアリング学会, pp.547-552, 2008.
- 25) 田中敏成, 白石哲也, “防水モジュール構造型の水陸両用型歩行ロボットの開発,” 第 23 回日本ロボット学会学術講演会論文集, pp.3125, 2005.
- 26) 田中敏成, “防水モジュール構造を採用した汀線測量ロボットの設計事例,” 設計工学, 社団法人日本設計工学会, Vol.43, No.3, pp.16-23, 2008.
- 27) T. Tanaka and T. Shiraiishi, “Development of Automated Shoreline Surveying System using Amphibious Walking Robot -The Design Concepts and the 1st Field Experiment-,” *Proc. of ISARC2006*, pp.46-51, October 2006.
- 28) S. J. Knight, A. A. Rula, “Measurement and Estimation of

- the trafficability of fine grained soils,” *1st Int. Conf. of ISTVS*, Preliminary Copy, No.24, 1961.
- 29) S. J. Knight, D. R. Freitag, “Measurement of soil trafficability characteristics,” *Trans. ASAE*, 5 (2), 1962.
- 30) 田中孝, 笈田昭, “車両・機械と土系の力学—テラメカニクス—,” 学文社, 1993.
- 31) 内海真, 酒井浩, 秋園純一, “ロボットの再構成や拡張を容易にするための汎用性の高い関節ユニットとシリアル通信方法の開発 (オープン化を指向したロボットコントローラアーキテクチャ 2),” *ROBOMEC’04 講演論文集*, pp.1P1-L1-7, 2004.
- 32) 田中敏成, 酒井浩, 秋園純一, “水陸境界域における自動測量ロボット実験機の開発,” *ROBOMEC’04 講演論文集*, pp.2A1-L2-23, 2004.
- 33) Y. Kanayama and M. Onishi, “Locomotion function in the mobile robot language, MML,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1110-1115, 1991.
- 34) K. Yoneda, K. Suzuki and Y. Kanayama, “Gait planning for versatile motion of a six legged robot,” *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, pp.1338-1343, 1994.
- 35) K. Yoneda, K. Suzuki, Y. Kanayama, H. Takahashi and J. Akizono, “Gait and Foot Trajectory Planning for Versatile Motions of a Six-Legged Robot,” *Journal of Robotic Systems*, 14 (2), John Wiley & Sons Inc., pp.121-133, 1997.
- 36) 田中敏成, 秋園純一, 高橋英俊, 佐藤栄治, 鈴木健治, 米田完, 金山裕, R. B. McGhee, 竹内俱佳, “歩行式水中調査ロボットの開発- (第4報) 歩容および軌道の実時間計画法-,” *港湾技術研究所報告*, 37 (2), pp.259-294, 1998.
- 37) テラメカニクス研究会編, “テラメカニクススライブラリー5 最新環境負荷低減の技術とシステム 環境調和型産業を目指して, (歩行式水中調査ロボット「アクアロボ」の開発—アクアロボのこれまでと今後—),” テラメカニクス研究会, pp.149-156, 2002.
- 38) 田中敏成, “連続歩容を適用した6足歩行ロボットの不整地静歩行実験,” *港湾空港技術研究所資料*, No.1026, 2002.
- 39) T. Tanaka, T. Shiraishi, and T. Hirabayashi, “Shoreline Survey Method using Amphibious Walking Robot and the Navigation Method Regarding Amphibious Traveling,” *Proc. of UT2007*, pp.268-275, 2007.
- 40) T. Tanaka, M. Yoshie and M. Oosato, “Development of an Underwater Vehicle that Has Functions of Acquisition and Tracking Target Objects Using Images Acquired by Itself,” *Proc. ISOPE2009*, pp.651-656, 2009.
- 41) 田中敏成, 吉江宗生, 小野寺美昭, “半自律型水中ビークルによる係留装置の模擬点検作業試験,” *土木学会海洋開発論文集*, Vol.25, pp.197-202, 2009.
- 42) 田中敏成, “水中バックホウの高度利用による水中作業の無人化の試み,” *建設機械*, Vol.44, No.11, 日本工業出版株式会社, pp.38-42, 2008.

港湾空港技術研究所資料 No.1236

2011.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています