

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.4 December 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 卷 第 4 号 (Vol. 42, No. 4), 2003年12月 (December 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. 難視界時の把持作業における触覚を用いた遠隔操作支援手法
..... 内海 真・酒井 浩・秋園 純一 3
(Manipulation Aid for Tele-operation Grasp in Unclear Environment
..... Makoto UTSUMI, Hiroshi SAKAI, Junichi AKIZONO)

2. 有明海における底泥輸送現象のモデル化
..... 中川 康之 25
(Numerical Modeling of Fine Sediment Transport Processes in the Ariake Bay
..... Yasuyuki NAKAGAWA)

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 卷 第 4 号 (Vol. 42, No. 4), 2003年12月 (December 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. 難視界時の把持作業における触覚を用いた遠隔操作支援手法
..... 内海 真・酒井 浩・秋園 純一 3
(Manipulation Aid for Tele-operation Grasp in Unclear Environment
..... Makoto UTSUMI, Hiroshi SAKAI, Junichi AKIZONO)

2. 有明海における底泥輸送現象のモデル化
..... 中川 康之 25
(Numerical Modeling of Fine Sediment Transport Processes in the Ariake Bay
..... Yasuyuki NAKAGAWA)

難視界時の把持作業における触覚を用いた 遠隔操作支援手法

内海 真* 酒井 浩** 秋園 純一***

要 旨

水中では、濁りにより視覚情報が乏しくTVカメラによる遠隔操作を行えない。このことが、遠隔操作式水中施工機械導入の障害となっている。この濁りに対応した把持機能を持つ遠隔操作式施工機械を水中施工に導入することで、不要なブロックの撤去や建造物の解体作業等の機械化が期待できる。把持作業を行うには、把持対象物の位置や形状、作業状況などの情報が必要である。通常これらは視覚で得ている情報であるが、濁りにより視覚が損なわれるため、TVカメラ以外の方法でこれらの情報を取得し、操縦者に提示する必要がある。

こうした問題に対して、著者らは、欠損した視覚情報の代わりに触覚情報を用いた手探りにより把持作業を行う方法を考案した。視覚補完手法として、指の接触をCG把持装置の描画色の変化で表す接触の視覚化、対象物との接触点の座標から対象物形状を描画する触像の視覚化、接触や把持の感覚を操作装置により操縦者に伝達するバイラテラル制御を用いる。これは、触覚を利用した手探りによる把持であるため、対象物を不用意に移動させてしまうことがある。そこで、対象物との接触時に把持装置の動作を停止するUIMD(UnIntentional Moving Deterrence)制御を加える。こうした視覚補完手法とUIMD制御を組み合わせ難視界に対応した操作支援を行う。

この操作支援を3指把持装置模型と、把持装置と相似形構造の操作装置、装置の姿勢や視覚化した触像を提示するVRモニターから成る把持システム模型に適用した。この把持システム模型を用いて、把持装置を対象物に接触させる接触実験を行い、UIMD制御により対象物の不用意な移動を抑えられることを確認した。さらに、分散配置したコンクリート塊と集積配置した小型ブロックを対象に、触覚を用いた操作支援による把持作業と目視による把持作業を行い、作業時間や成功率等を比較した。実験の結果、目視と比較すると作業時間が掛かるが、把持作業自体は100%近く遂行できることが分かり、本操作支援の有効性が明らかとなった。

キーワード：操作支援、把持装置、遠隔操作、触覚、水中施工

* 施工・制御技術部 制御技術研究室 特別研究員

** 施工・制御技術部 制御技術研究室長

*** 施工・制御技術部 新技術研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

電話：0468-44-5062 Fax：0468-44-0575 e-mail：utsumi@pari.go.jp

Manipulation Aid for Tele-operation Grasp in Unclear Environment

Makoto UTSUMI*
Hiroshi SAKAI**
Junichi Akizono***

Synopsis

Introduction of grasp machines to underwater construction promotes mechanization of setting and removing works. In grasp operation, it is necessary to confirm the shapes and the positions of objects. As naked eye or TV camera is useless in turbidity such as the underwater in port area, an operator hardly carries out tele-operated grasp work. Thus, it is required that tele-operation method adapted for unclear environment using other information which is substitutable for visual information.

Therefore, we are studying the tele-operation system of grasp machine by groping using tactile sense substituting for visual information. This system indicates contact information by the painted color painted on the CG gripper drawn on the monitor, visualizes the image of an object by the contact points between the gripper and the object, and feeds back contact and grasp feeling to the operator by bilateral control. Furthermore, for preventing unintentional motion of objects by groping, when the gripper detects contact then the automatic stop control is applied to the gripper. Combining these vision compensations and automatic stop control, we have constructed manipulation aid system for unclear environment.

For the experiment of this system, we have developed a master-slave model of a gripper. Using this model, we have done grasp experiments that removing scattered blocks and gathered smaller blocks by naked eye and tactile sense. As a result, the validity of this manipulation aid system is verified by the experimental data.

Key Words : Manipulation aid, Grasp system, Tele-operation, Underwater construction, Tactile

* Visiting Researcher of Control Systems Division, Construction and Control systems Department

** Head of Control Systems Division, Construction and Control systems Department

*** Research Coordinator for Advanced Technology, Construction and Control systems Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-046-844-5062 Fax : +81-046-844-0575 e-mail : utsumi@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. 緒言	7
2. 操作支援方法	7
2.1 基本モデルの定義	8
2.2 UIMD (UnIntentional Moving Deterrence) 制御	8
2.3 接触の伝達	10
2.4 触像の視覚化	11
3. 把持システム模型	12
3.1 把持装置 (スレーブ)	13
(1) アーム部	13
(2) ハンド部	13
(3) 接触センサ	14
3.2 操作装置 (マスタ)	14
(1) アーム部	14
(2) ハンド部	15
3.3 VR モニタ	15
4. 接触実験	16
4.1 実験方法	16
4.2 実験結果	16
5. 把持作業実験	18
5.1 実験方法	18
5.2 実験結果	18
6. 結言	22
謝辞	22
参考文献	22
付録	23

1. 緒言

水中施工は陸上施工と比較して機械化が遅れている。水中では、波浪や潮流、水圧、濁りといった陸上よりも困難な作業条件がある。特に水中の濁りは、視覚を損ない、TVカメラによる施工機械の遠隔操作を困難にしている。これにより、陸上では進展している危険な被災地などの遠隔操作無人施工^{1), 2)}を定常的に無人化が必要な水中において実現できていない。現状の水中施工で使用される施工機械は、濁りの少ない水中において潜水士が直接搭乗する水中バックホウ^{3), 4)}等にとどまっている。それ故、この濁りに対応した遠隔操作水中施工機械を開発することができれば、水中施工の機械化は大きく進展することになる。中でも作業に必要な基本的機能の一つである把持機能を持つ施工機械を水中施工に導入することで、不要なブロックの撤去や建造物解体作業等の機械化の進展が期待できる。

把持作業を行うには、把持対象物の位置や形状、作業状況などの情報が必要である。濁りのある水中では、通常、視覚で得ているこれらの情報を得ることができないため、TVカメラ以外の方法でこれらの情報を取得し、操縦者に提示する必要がある。TVカメラの代わりに映像を得る研究として、超音波による映像装置の研究^{5)~6)}もなされているが、超音波映像装置は、対象物の形状によって像を正しく得られない場合もあり、現状ではTVカメラの完全な代替にならない。

こうした現状に対して、著者らは、反力や触覚情報を拡張加工することで、乏しい視覚情報を補完する方法を提案してきた^{7)~10)}。これまでに、手法の基礎的検討を行うため、コンピュータのVR環境内に把持装置と把持対象物を置き、実世界の操作装置を用いて把持作業を行う把持作業シミュレータ開発した。このシミュレータを用いて、被験者による把持実験を行い、視覚補完手法の有効性を確認した。

次の段階として、より現実に近い状況で実験を行うため、把持アタッチメント付きバックホウのようなアーム型の装置を想定し、把持装置模型と相似形操作装置による把持システムを開発した。この把持システムに、これまでの成果である視覚補完手法を改良して取り入れた。本把持システムは、触覚を利用した手探りで遠隔操作を行う。しかしながら、人間が直接手探りで作業する場合と異なり、機械による手探りでは操縦者に伝達される情報が少ないため、対象物を不用意に移動してしまうことが考えられる。陸上の施工において、掘削面が運転室から見えないような深掘作業時に、CGにより作業状況

を提示するとともに、掘り過ぎを防止するように建機を自動制御する積極的な操作支援が行われている¹³⁾。そこで対象物の不用意な移動を防止するUIMD (UnIntentional Moving Deterrence) 制御を取り入れ、視覚補完手法と共に組み合わせて操作支援を行う。図-1に把持システムのイメージを示す。

本論文では、まず、難視界時の把持作業における操作支援の方法について論ずる。次に本操作支援方法を適用した把持システム模型の構成や制御に関して説明する。さらに、この把持システム模型を用いて、UIMD制御の有効性を検証する接触実験を行う。また、異なる条件で配置した対象物の把持作業実験を行い、本操作支援手法の有効性を確認する。

2. 操作支援手法

本章では、視覚補完手法と対象物の不用意な移動を防止するUIMD制御を組み合わせた操作支援手法に関して論ずる。

これまでに、視覚補完の手法としては、

- 1) 把持装置の状態をCG (Computer Graphics) で描画すると共に指に作用する反力を、描画色の変化として視覚化する。
- 2) 触像の視覚化により対象物との接触点の座標から対象物の形状を描画する。
- 3) パイラテラル制御により作用した反力を操作装置により操縦者に伝達することで、把持や接触の感覚を与える。

を提案し、シミュレータ実験で有効性を検証した。シミュレータでは、指に作用する3方向の反力と接触を検出していたが、現状では、各指に接触も検出できる3方向の力センサを組み込むことは困難である。

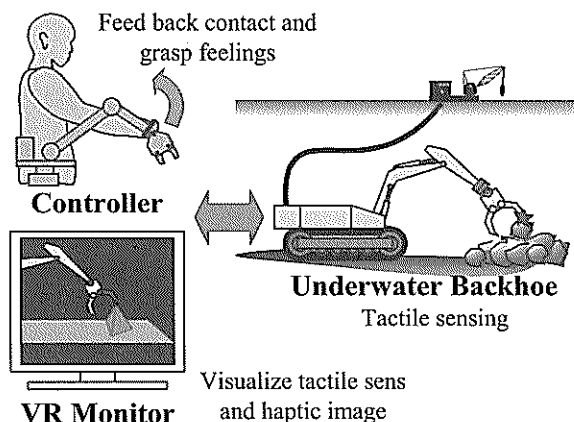


図-1 把持システムイメージ

そこで、比較的構成が容易な接触センサにより把持装置の指の接触を検出することとし、この接触情報を用いて、上記3つの視覚補完を行う。1) に関しては、そのまま適用する。2) に関しては、シミュレータでは、1つの対象物だけであったため、複数個の対象物に対応できるようにする。3) に関しては、反力提示操作装置が操縦者の指に的確に反力を提示できないことがあり、把持対象物を持ち上げる場合に反力により振り回され、対象物を落下してしまう問題があった。バイラテラル制御による反力の提示の有効性は、遠隔操作医療分野¹⁴⁾や、宇宙分野¹⁵⁾等様々な分野において報告されている。接触や把持の感覚の伝達は、情報が乏しい遠隔操作では非常に有効である。そこで、操作装置のハンド部分を操縦者が手をいれて操縦を行うグローブ状の構造とすることで、接触や把持を確実な伝達を実現する。さらに、操作装置全体も把持装置と相似形の構造とすることで、直感的な操作を可能とし、操作性の向上を図る。

本把持システムはバイラテラルマスタ・スレーブ制御システムであり、操作装置(マスタ)と把持装置(スレーブ)の位置姿勢は同期することが望ましい。一般に位置指令・位置帰還バイラテラル制御を常に作用させることにより把持装置と操作装置の位置姿勢の同期を取ることが可能である。しかしながら、同期を取る制御により操縦者が操作装置を動かす速度より把持装置の動作が遅い場合、操作装置の動作を抑制する制御が作用することになる。したがって、操縦者が操作装置を動かす時、常にこの制御による抵抗が作用するため、操作しにくくなる問題がある。そこで、把持装置が接触したときだけ位置制御が作用するようにする。この位置制御による抵抗感で、操縦者は、接触を感じることができる。また、この接触時に、操作装置と把持装置の位置姿勢の同期が取れるようになる。

把持の感覚に関して、遠隔操作で対象物の柔らかさを伝達する研究も行われている^{16), 17)}。施工分野では、硬い対象物が主となることもあり、ここでは、柔らかさに関しては取り扱わない。把持の感覚は、指の接触時に位置制御を作用させることで伝達する。このように、本把持システムは、触覚を用いて手探りで把持を行う。

対象物の不用意な移動の原因としては、以下のようなことが考えられる。まず、バイラテラル制御により接触を伝達しても、操縦者が接触を認識して、操作を止めるまでには若干の時間を要する。また、普通、把持装置は操作装置の動作に若干遅れて追従するため、操縦者が接触を認識して、操作を停止しても、把持装置はすぐに停止するわけではない。対象物を手探りで探そうとして

も、こうした認識の遅れや追従の遅れにより、触覚で探した対象物を不用意に移動してしまう恐れがある。そこで、不用意な対象物の移動を抑止するため UIMD 制御では、対象物と接触したときに把持装置の動作を停止するように制御を行う。

2.1 基本モデルの定義

まず、以降の説明で必要となる本研究で対象とする把持装置の基本モデルを定義する。図-2 に把持装置のリンクモデルを示す。把持装置は、3指のハンド付きミニピュレータを想定する。アーム部は3自由度 ($J_1 \sim J_3$)、ハンド部の自由度は手首2自由度 (J_4, J_5)、各指1自由度 ($J_6 \sim J_8$) の5自由度である。各関節の角度は θ_i で表す ($i=1 \sim 8$)。相似形の操作装置は、把持装置と同様の構成になる。また、図中において、 p_a, p_h, p_k ($k=1, 2, 3$) はそれぞれ、アーム先端座標、ハンド位置座標、指先座標を表す。

これ以降の計算において、添え字 s はスレーブ(把持装置)、 m はマスタ(操作装置)を表す。

2.2 UIMD (UnIntentional Moving Deterrence) 制御

UIMD 制御は把持対象物と接触したときにスレーブの目標位置を固定し、不用意な対象物の移動をできる限り回避する制御である。ただし、このまま位置を固定してしまうと、それ以後、移動できなくなるため、接触した時の移動方向と逆方向に移動可能なようにする。

移動方向は、指先の移動方向をとることも考えられるが、3点の軌跡となり、移動方向の判別が困難になるため、ハンド部の移動方向を取る。

スレーブハンド現在位置を p_{hs} 、前回の位置を p_{prev} とすると、通常、スレーブの移動方向 d_s は、

$$d_s = p_{hs} - p_{prev} \quad (1)$$

で求められる(図-3 (a))。しかしながら、スレーブ

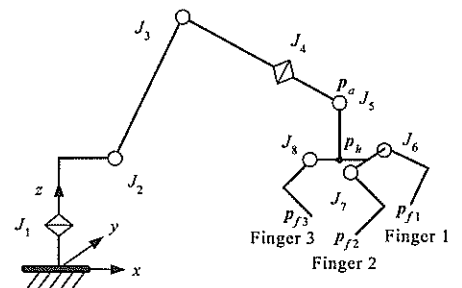


図-2 把持装置リンクモデル

の移動量が小さい場合は、センサノイズの影響などにより移動方向を正しく取得できない。そこで、基準位置 p_o (初期値は p_{hs} の初期値) を設定する。アームの移動量が、最小移動量 D_{min} に対して

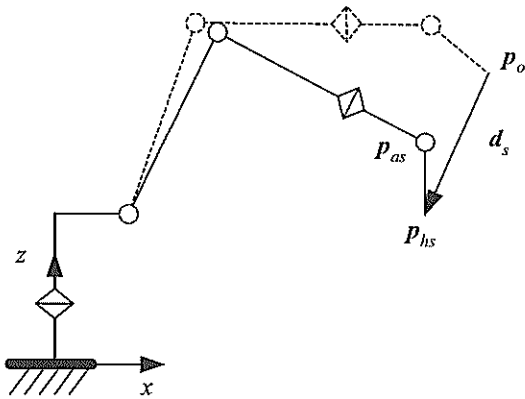
$$|p_{hs} - p_o| > D_{min} \quad (2)$$

となるとき、アームの移動方向 d_s を

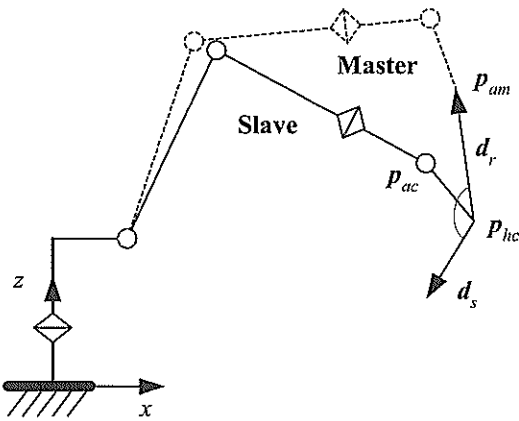
$$d_s = p_{hs} - p_o \quad (3)$$

で求める。また、このとき基準位置 p_o を

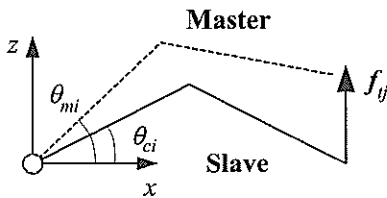
$$p_o = p_{hs} \quad (4)$$



(a) 移動軌跡



(b) 接触



(c) 指の接触

図-3 スレーブの接触

として更新する。

3本の指のうちどれかが接触したとき、UIMDモードになり制御が作用する。UIMDモードは、図-3(b)のハンド座標 p_{hs} が接触時の p_{hc} から一定の距離 D_{leave} 離れたときクリアする。UIMDモードを *TRUE* (真), *FALSE* (偽)の真値で表す *BOOL*型変数 *UIMD* (初期値 *FALSE*) は、各指の接触を表す *BOOL*型変数 *Contact_i* (初期値 *FALSE*, $i=1,2,3$) に対して、*UIMD=FALSE* のとき

$$\left. \begin{aligned} UIMD &= Contact_1 \cup Contact_2 \cup Contact_3 \\ UIMD &= TRUE \cap |p_{hs} - p_{hc}| > D_{leave} \text{ のとき} \\ UIMD &= FALSE \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。

UIMDモード中は、マスタの位置を p_{hm} とする。目標方向ベクトル d_r を、

$$d_r = p_{hm} - p_{hc} \quad (6)$$

で求め、 d_r と d_s の角度 α からスレーブを移動可能か判断する。スレーブのアーム部目標位置 p_{ras} 、ハンド部目標角度 θ_{rs4} , θ_{rs5} , 接触時のハンド部角度 θ_{c4} , θ_{c5} とすると

$$\left. \begin{aligned} \alpha > 120^\circ \text{ のとき移動可能} \\ p_{ras} &= p_{am} \\ \theta_{rs4} &= \theta_{m4} \\ \theta_{rs5} &= \theta_{m5} \\ \alpha \leq 120^\circ \text{ のとき位置固定} \\ p_{ras} &= p_{ac} \\ \theta_{rs4} &= \theta_{c4} \\ \theta_{rs5} &= \theta_{c5} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

また、アームを上方に移動しているときに物体に触れた場合、この制御により下方にしかアームの移動が行えなくなり、地面や対象物とはさまれ移動不能になる場合がある。そこで、 d の z 方向成分 $d_z > 0$ のとき

$$d_z = -d_z \quad (8)$$

とし、常に上方へ移動できるようにする。

次に、接触した指は、接触センサの反応方向に動作できないようにする。この制御により指による不用意な移動を抑止できるが、物体を把持するときに十分な把握力を得ることができなくなる。そこで、把持を検出した場合は、この制御を作用させないようにする。

把持の判定は、対向する2本の指が接触したときを把

持とする。把持の状態からすべての指が非接触となったときに開放と判定する。把持を表す BOOL 型変数 *Grasp* (初期値 *FALSE*) は、

$$\left. \begin{aligned} &Grasp=FALSE \text{ のとき} \\ &Grasp = (Contact_1 \cup Contact_2) \cap Contact_3 \\ &Grasp=TRUE \text{ のとき} \\ &Grasp = Contact_1 \cup Contact_2 \cup Contact_3 \end{aligned} \right\} (9)$$

として求める。

図-3 (c) のように接触した指において、接触センサの *z* 方向の出力を $f_{c_{ij}}$ ($j=1,2,3$), 現在角度 θ_{si} ($i=6,7,8$), 接触時の角度 θ_{csi} , マスタの現在角度 θ_{mi} とすると、目標角度 θ_{rsi} は

$$\begin{aligned} dir &= f_{c_{ij}} \times (\theta_{mi} - \theta_{si}) \\ \theta_{rsi} &= \begin{cases} \theta_{mi} & (dir > 0 \cup Grasp = TRUE) \\ \theta_{csi} & (dir \leq 0 \cap Grasp = FALSE) \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

とする。

2.3 接触の伝達

マスタの位置制御は接触したときに作用させる。このときのアーム先端の目標位置は、スレーブ先端の目標位置になる。スレーブと同様に位置制御が行われると、それ以上マスタを動作することができなくなるため、スレーブから移動方向 d_s を取得して、マスタの可動方向を計算する。操縦者の操作によるマスタの移動方向が可動範囲内であれば、位置制御を作用させない。これにより、接触後の移動が可能となり、スレーブも接触点から離脱できるようになる。

まず、図-4 (a) の接触時 ($UIMD=TRUE$) にマスタのアーム部目標位置 p_{ram} , ハンド部目標角度 $\theta_{rm4}, \theta_{rm5}$ は、

$$\left. \begin{aligned} p_{ram} &= p_{ac} \\ \theta_{rm4} &= \theta_{c4} \\ \theta_{rm5} &= \theta_{c5} \end{aligned} \right\} (11)$$

となり、マスタはスレーブ姿勢に合うように制御される。このとき操縦者は、接触を感じる。

マスタのアーム先端位置 p_{am} , ハンド位置 p_{hm} , とするとき、接触時のスレーブのハンド先端位置 p_{hc} に対し

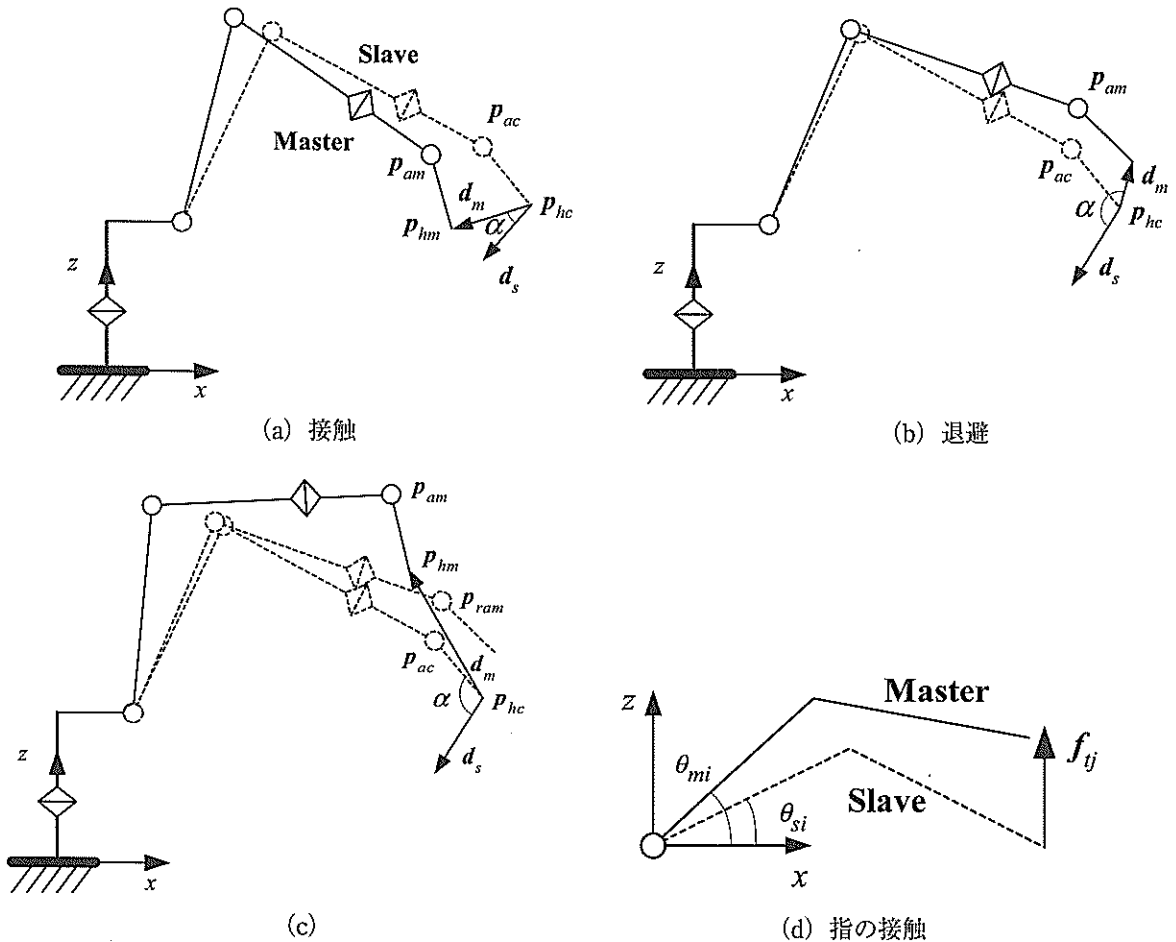


図-4 マスタによる接触の伝達

て、操縦者の操作による移動方向 d_m を

$$d_m = p_{mh} - p_{hc} \quad (12)$$

により求める (図-4 (a)). スレーブと同様に、この d_m と d_s の角度 α を調べる (図-4 (b)). 関節の無拘束 (モータ電流 0) を表す BOOL 型変数 $Free_i$ (初期値 TRUE, $i=1\sim 5$) は、

$$Free_i = \begin{cases} FALSE & (\alpha > 120^\circ) \\ TRUE & (\alpha \leq 120^\circ) \end{cases} \quad (13)$$

となる. $Free_i=FALSE$ のとき制御が作用する. $Free_i=TRUE$ であれば、移動可能であり、このときのマスタの位置、角度を目標位置に保存しておく (図-4 (c)).

$$\left. \begin{aligned} p_{ram} &= p_{am} \\ \theta_{m4} &= \theta_{m4} \\ \theta_{m5} &= \theta_{m5} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

これにより、 $Free_i=FALSE$ となったときに、この移動可能であった位置に引き戻される. この制御は、 $UIMD=FALSE$ となるまで継続する.

また、接触しているスレーブの指 i ($i=6, 7, 8$) と対応するマスタの指に対して $Free_i$ (初期値 TRUE) は、

$$dir = f_{zi} \times (\theta_{mi} - \theta_{si})$$

$$Free_i = \begin{cases} FALSE & (dir > 0) \\ TRUE & (dir \leq 0) \end{cases} \quad (15)$$

となる. $Free_i=FALSE$ のとき制御が作用し、目標角度は、

$$\theta_{mi} = \theta_{si} \quad (16)$$

とする (図-4 (d)). これにより、操縦者に対して指の接触や把持を伝達する.

2.4 触像の視覚化

CG により等間隔のメッシュで分割した触像地形を構成し、指先が対象物や地形に接触したときの指先位置にこのメッシュの頂点を更新することで、対象物の形状や位置を視覚化する. この方法により、複数個の対象物にも対応できる.

以降は、あるスレーブの 1 本の指に対しての処理であるが、実際には 3 指分別個に同様の処理を行う. 図-5 (a) のように、大きさ $l_x \times l_y$ で $m \times n$ 個の格子点を持つ触像地形を考える. 指先座標を p_{sf} (p_{sfx} , p_{sfy} , p_{sfz}) とする. 指が接触したとき、 p_{sf} の $x-y$ 平面座標 p_{sfx} , p_{sfy} にもっとも近い触像地形の格子点 p_{vi} を

$$i = \text{INT}(p_{sfx} + 0.5) \times n + \text{INT}(p_{sfy} + l_y / 2 + 0.5) \quad (17)$$

で求める (図-5 (b)). ここで INT は整数化する関数である.

頂点更新の条件は、接触センサの接触を表す変数 $Contact$ が FALSE (非接触) \rightarrow TRUE (接触) に変化したときであり、かつ把持しているときは更新しない. こ

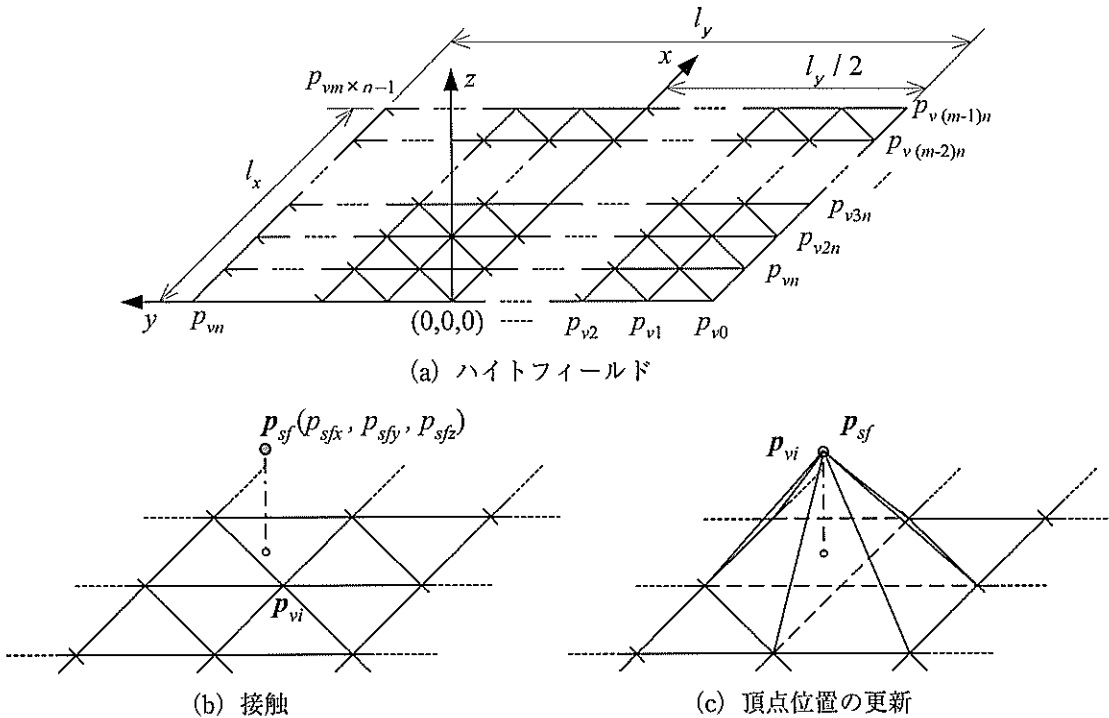


図-5 触像の視覚化

これらの条件から、頂点の更新可否を表す BOOL 型変数を *Modify* (初期値 *TRUE*) とすると、

$Contact \wedge \overline{Grasp} \wedge Modify=TRUE$ のとき

$$\left. \begin{aligned} P_n &= P_{sfz} \\ Modify &= FALSE \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

とし頂点の更新を行う (図-5 (c)) とともに、以降の連続した更新を禁止する。また、

$Contact \wedge \overline{Grasp}=FALSE$ のとき

$$Modify=TRUE \quad (19)$$

となり、頂点更新を可能とする。

触像の視覚化により更新された地形は、対象物の移動後、再び接触により頂点位置の更新が行われるまで変化することはない。移動後に残された触像地形の変化は、“虚像”であり、残したままにしておく、作業時に混乱を招くことになる。そこで、この“虚像”と判断した頂点はトリミングする。虚像の判定は、接触していない指先の高さが、頂点より下にあるか否かで行う。

ある指 *k* の指先が座標 p_{sf} にあるとき式 (17) で対応する触像地形の頂点 *n* を求める。頂点 *n* の高さ p_{vnz} に対して、 p_{sfz} が低い場合には、頂点 *n* の高さを p_{sfz} に更新する。頂点トリミングの可否は、前回検出した頂点番号 n_{prev} と *n* を比較した結果から、BOOL 型の変数 *Trim* で決定する。

$$Trim = \begin{cases} TRUE & (n_{prev} \neq n) \\ FALSE & (n_{prev} = n) \end{cases} \quad (20)$$

$Trim=TRUE \wedge p_{sfz} < p_{vnz}$ のときに、

$$\left. \begin{aligned} P_n &= P_{sfz} \\ Trim &= FALSE \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

として、頂点のトリミングを行う。このとき *Trim=FALSE* となっているので、再び式 (20) の条件に当てはまるまで、頂点の更新は行わない。

3. 把持システム模型

図-6 に把持システム模型を示す。把持システムは、把持装置 (スレーブ)、操作装置 (マスタ)、VR モニタからなる。各装置、モニタ用にコンピュータを 3 台使用し、それぞれのコンピュータは、通信規格 100BASE-T の LAN 回線で接続して、UDP プロトコルでデータ転送を行う。図-7 に把持装置と操作装置の基本寸法を示す。把持装置と操作装置の各関節間の寸法を同一にしてある。把持装置の姿勢は操作装置の姿勢に完全に一致する。図-8 にマスタ・スレーブシステムの制御系を示す。把持装置、操作装置ともに位置制御による制御系で、操作装置からは、アーム先端位置とハンド部の各角度が送信され、把持装置からは、アーム先端位置、ハンド部の各関節角度、接触及び把持の有無、移動方向などが送信される。ここで取得された操作装置の情報は、VR モニタ用のコンピュータにも送信される。

操作装置、把持装置の位置制御器の目標位置は、接触等の状態にあわせて、2章のアルゴリズムをもとに接触制御器、UIMD 制御器により切り替えられる。

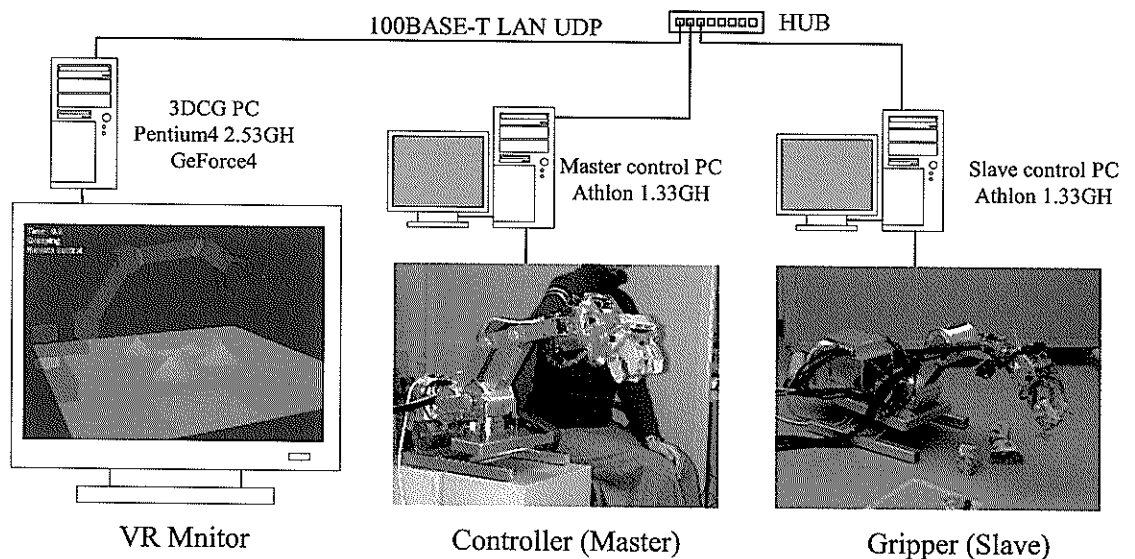
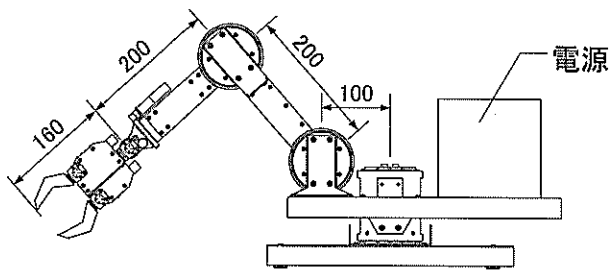
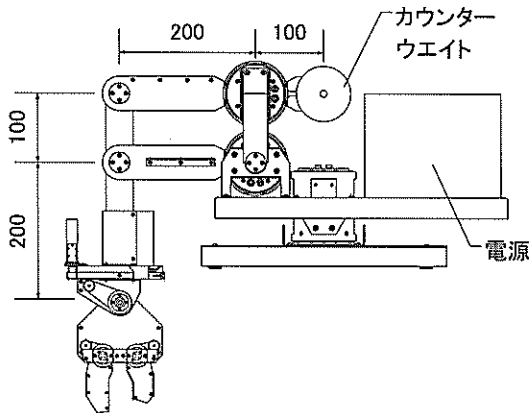


図-6 把持システム模型



(a) 把持装置 (スレーブ)



(b) 操作装置 (マスク)

図-7 把持装置と操作装置

3.1 把持装置 (スレーブ)

把持装置は、図-2と同じ関節構成の3指ロボットハンドである。各関節をDCモータで駆動し、関節角度はポテンショメータで取得する。把持装置の指先には接触センサを取り付け3方向の接触を検出する。把持装置の制御系の構成を図-9に示す。

(1) アーム部

把持装置のアーム部の各関節は20WのDCモータで駆動する。アーム部の目標位置はアーム先端座標で与える。各関節は、目標角度をアーム先端座標から逆運動学により求め、位置制御を行う。関節*i*の位置制御は、目標角度と現在角度の誤差に比例制御ゲイン k_{psi} を掛けて、速度制御器に速度指令として与えることで行う。速度制御はモータ駆動回路の速度制御機能で実現する。指令値は0~5Vの電圧で与える。

(2) ハンド部

ハンド部の各関節は2.5WのDCモータで駆動する。各関節のモータ駆動回路の位置制御機能を用いて、位置制御を行う。指令値である-5~+5Vの電圧で与える。

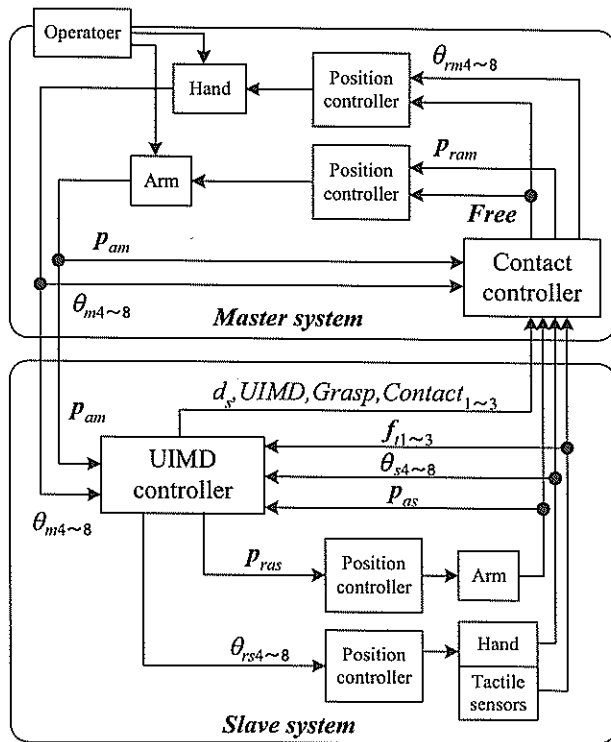
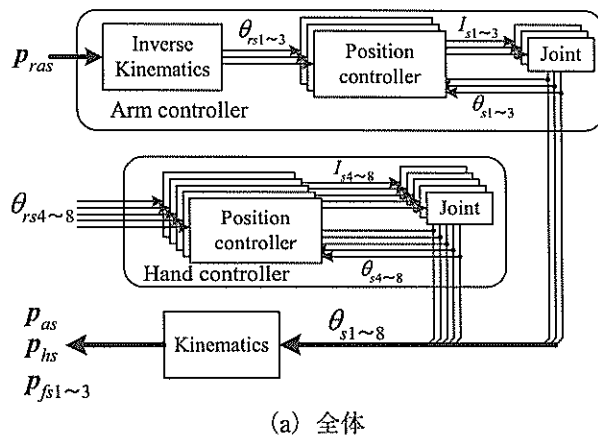
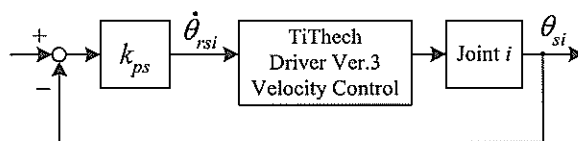


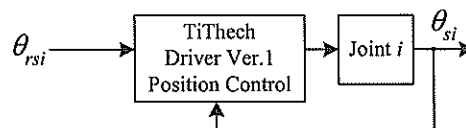
図-8 マスタ・スレーブ制御系



(a) 全体



(b) アーム部 ($i=1\sim3$)



(c) ハンド部 ($i=4\sim8$)

図-9 スレーブの位置制御系

(3) 接触センサ

接触検出に関しては、ロボットハンドの触覚として、様々な方法が考案され、成果をあげている^{18), 19)}。これらのセンサは、柔軟な構造のものであり、本研究で対象にする硬く不定形な石やコンクリートブロックに対して、十分な耐久性を有していない。

そこで本接触センサは、指の基本フレームに感圧センサを貼り付け、これにセンサカバーをかぶせる構造とした。図-10に把持装置模型の接触センサを示す。感圧センサは、導電性のエラストマセンサで、力(圧力)の変化を抵抗値の変化にする。センサカバー部のどこかが接触すると、感圧センサが変形し、接触を検出する。本接触センサの構造であれば、対象物と直接接触するのはカバー部分であり、感圧センサには余計な力が作用しない。また、感圧センサだけで接触の感知を行う場合、指全体のどの部分でも接触を感知するためには、感圧センサを指全体に貼り付けなければならない。本センサ構造であれば、接触部位を特定することはできないものの、要所に接触センサを貼り付けることで、指全体の接触を感知できる。本接触センサは、x軸-方向、y軸±、z軸±方向の接触を検出できる。

接触の判定は、3方向の接触の合成により行う。接触の判定時にセンサ出力を単純な閾値で振り分けると、ノイズ等の影響でチャタリングを生じ、接触・非接触の状態

が振動的に起こりやすくなる。そこで、閾値を2つ設けるスレッシュホールド型処理を行うことにより、チャタリングを防止する。

指*i* (*i*=1, 2, 3)の接触センサの出力を $f_{ci}=[f_{cxi}, f_{cyi}, f_{czi}]$ とすると、接触を表すBOOL型変数 $Contact_i$ (初期値FALSE)は、

$$\begin{aligned}
 & Contact_i=FALSE \text{ のとき} \\
 & Contact_i = \begin{cases} TRUE & (|f_{ci}| > TH_{up}) \\ FALSE & (|f_{ci}| \leq TH_{up}) \end{cases} \\
 & Contact_i=TRUE \text{ のとき} \\
 & Contact_i = \begin{cases} TRUE & (|f_{ci}| > TH_{low}) \\ FALSE & (|f_{ci}| \leq TH_{low}) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{24}$$

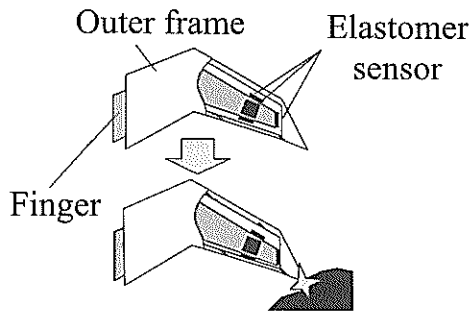
で求める。ただし、 TH_{up} , TH_{low} 接触判定の上位閾値、下位閾値である。

3.2 操作装置(マスタ)

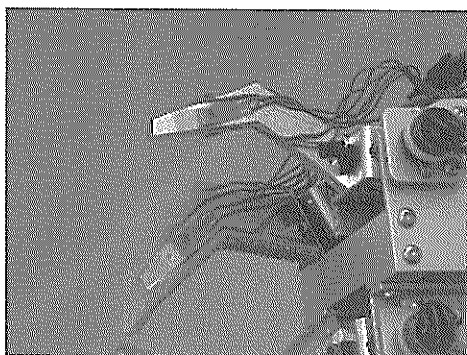
操作装置は、把持装置と同様な関節構成にする必要があるが、まったく同様な形状ではハンド部の重量でアームが下方に下がってしまう。そこでアーム部の機構をパンタグラフ機構とし、カウンタウエートをつけることで、ハンド部の重量キャンセルを行い、アームが垂れ下がるのを防いでいる。各関節はDCモータで駆動し、関節角度はポテンシオメータで取得する。操作装置の制御系の構成を図-11に示す。各関節には操縦者の操作力 f_{op} が作用する。各関節の位置制御は、接触制御器からの出力0指令Freeにより、無拘束状態になる。通常、各関節は無拘束状態で、容易に動かすことが可能である。

(1) アーム部

アーム部の各関節は、20WのDCモータで駆動する。アーム部の位置制御は、アーム先端の目標位置を与えることで行う。把持装置と同様にアーム先端の目標位置から逆運動学により、各関節の目標角度を計算する。各関節の位置制御は、速度制御、トルク制御を内部に持つ。 k_{pmi} は位置制御ゲインで、 k_{vmi} は速度制御ゲインである。急激な動作から操縦者を保護するためリミッタを設けた速度制御を行っている。トルク制御はモータ駆動回路のトルク制御機能で実現する。操作装置では、速度制御にモータ駆動回路の速度制御機能を用いていない。操作装置では、把持装置が接触したとき以外は位置制御を作用させず、操縦者が自由に動かせるようにしなければならない。モータ駆動回路の速度制御機能を用いると目標速度0のときも制御が作用する。操縦者の操作によ



(a) 接触の検出



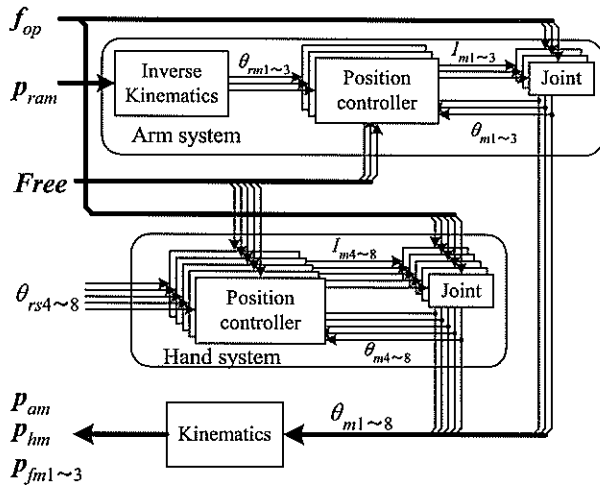
(b)

図-10 接触センサ

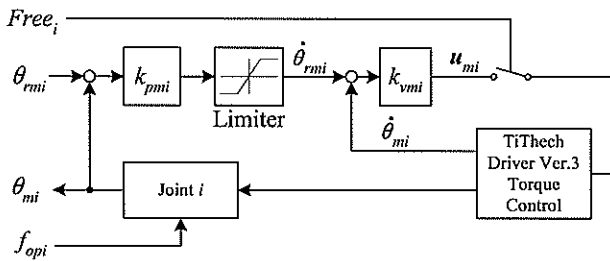
りモータが動かされると、速度を0にするようにモータに制御が作用して抗力を発生するため、操作装置を自由に動かすことができなくなる。そこで、速度制御は、目標速度とモータ駆動回路の電子ガバナの速度出力を検出し、ソフトウェアで実現している。

(2) ハンド部

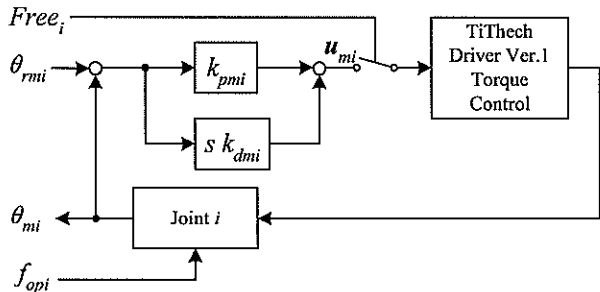
ハンド部は4.5WのDCモータで駆動する。各関節の位置制御は、PD制御である。 k_{di} は関節*i*の微分ゲインである。目標角度と現在角度の差をトルク指令値として、トルク制御器に与える。トルク制御は、モータ駆動回路のトルク制御機能で実現する。指令値は-5~+5Vの電圧で与える。



(a) 全体



(b) アーム部 (i=1~3)



(c) ハンド部 (i=4~8)

図-11 マスタの位置制御系

3.3 VR モニタ

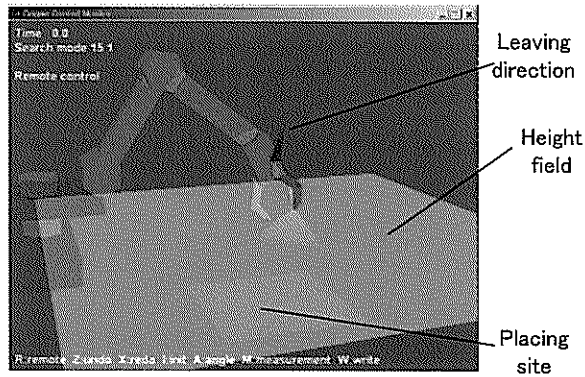
図-12にVRモニタを示す。VRモニタには、把持装置、触像地形と把持対象物を設置するための目安である設置領域を描画する。把持装置の姿勢は、各関節角のデータをもとに再現する。把持装置を半透明で描画することで、把持装置の死角になる部分が出ないようにする。

シミュレータ実験では、3方向からのカメラアングルの画像を同時に描画していたが、今回は3つのカメラアングルを切り替えて選択できるようにした。アングル1(図-12(a))は斜め後方からの俯瞰に、アングル2(図-12(b))は真上からのアングルで、アーム先端位置と一緒に視点が移動する。アングル3(図-12(c))は側面からの視点である。これらのカメラのアングルや距離は、マウスで変更することができる。

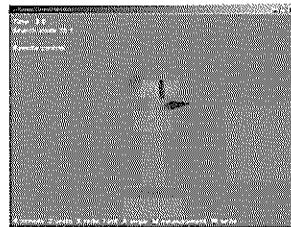
また、把持装置が接触したときには、UIMD制御による動作停止を解除するための退避方向を提示する。

触像地形は、格子状のハイトフィールドを三角形のポリゴンで構成している。フィールドの大きさは900mm×900mm、メッシュの間隔は30mmである。ポリゴンは頂点色によるグローシェーディングを用いて、描画色を滑らかに変化させている。頂点の色は頂点の高さに応じて変化する。

図-13に触像の視覚化により描画した物体を示す。メッシュが粗いため詳細な形状や、サンプル2のような複



(a) 俯瞰

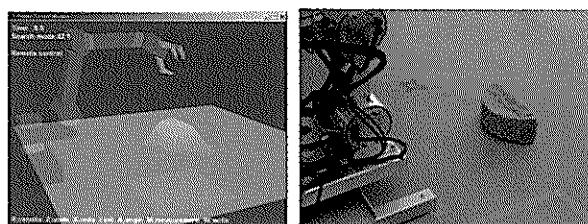


(b) 上方

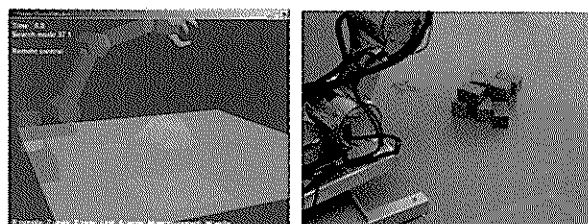


(c) 側方

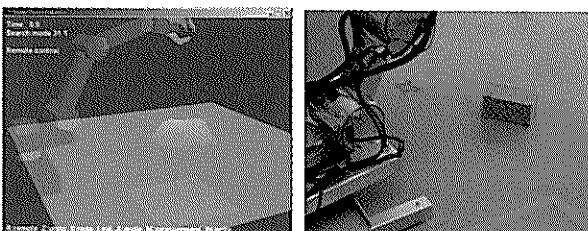
図-12 VRモニタ



(a) サンプル 1 (接触回数42回)

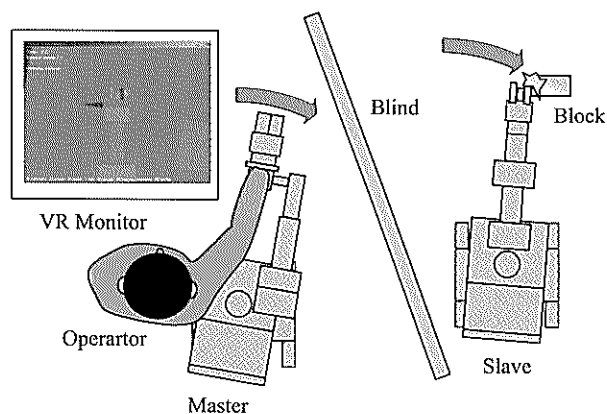


(b) サンプル 2 (接触回数37回)

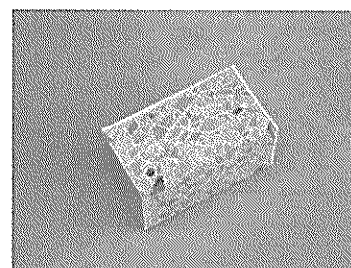


(c) サンプル 3 (接触回数31回)

図-13 触像の視覚化例



(a) 実験の様子



(b) コンクリートブロック

図-14 接触実験

数個の物体の区別ができない。実際には、図-13よりも少ない接触回数の画像で、把持可能である。

4. 接触実験

UIMD 制御の有効性を確認するため、把持装置を旋回させて物体に接触させ、接触に伴う物体の移動量を制御の有無により比較する実験を行う。

4.1 実験方法

図-14 (a) のように、操縦者は、把持装置と対象物が見えない状態で VR モニタを見ながら操作装置を用いて把持装置を旋回させる。把持装置が接触し、VR モニタにおいて接触した指の描画色が変わったら、旋回を止めるようにする。把持装置は旋回動作だけ行うようにするため、操作装置の旋回部分以外の関節を固定する。接触に伴う物体の移動量は、衝突するときの旋回速度で異なる。そこで、一定速度で旋回するように、VR モニタにベースメーカーとなる球体を描画する。操縦者はこの球体の動きに合わせて旋回動作を行う。旋回速度は、把持装置の旋回可能速度内の $10^\circ/\text{sec}$ に設定している。対象

物は、図-14 (b) 示すコンクリートブロック (686g, 103mm×58mm×50mm) で、床面において約 160g の力で滑り始める。実験の試行回数は制御無しの場合と停止制御の場合のそれぞれに対して 5 回行う。対象物の位置は毎回変更し、操縦者には位置を知らせない。

計測はブロックの移動量と操作装置の旋回角度の変化から、センサが接触を検出してから操作者が接触を認識し旋回を止めるまでの時間、把持装置の旋回角度の変化から、接触検出から把持装置が停止するまでの時間をそれぞれ計測する。

4.2 実験結果

実験結果を表-1 に、平均値のグラフを図-15 に示す。また把持装置と操作装置の旋回と接触検出の様子を図-16 に示す。

結果から、接触によるブロックの移動量は、制御なしの場合、平均 31mm であるのに対して、制御ありの場合は平均 0.4mm とほとんど移動していない事がわかる。

UIMD 制御なしの場合、接触をセンサで検出してから、操縦者が接触を認識して旋回を止めるまでの時間が平均 0.36s、接触検出から把持装置が止まるまでの時間

表-1 接触実験結果

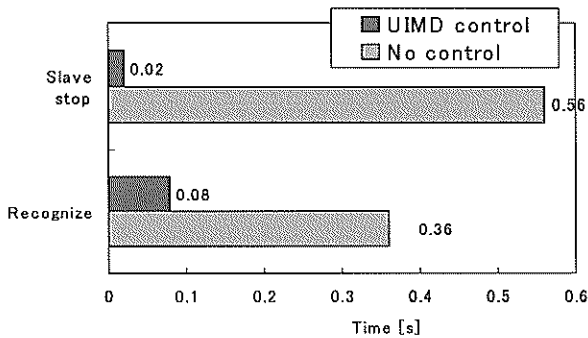
Control	No.	Master stop[s]	Slave stop[s]	Moved displacement[mm]
OFF	1	0.3	0.5	25
	2	0.3	0.5	21
	3	0.4	0.5	24
	4	0.4	0.6	53
	5	0.4	0.6	32
	Aver.	0.36	0.56	31
ON	1	0.1	0	0
	2	0.1	0	0
	3	0.1	0	2
	4	0	0	0
	5	0.1	0.1	0
	Aver.	0.08	0.02	0.4

は平均 0.56s であり、操作装置の停止から、把持装置の停止時間にも時間差がある。図-16 からわかるように、把持装置は操作装置に追従するため、操作装置と把持装置の旋回角度に誤差を生じている。操縦者が接触を認識して、旋回操作を停止しても、実際に把持装置が停止す

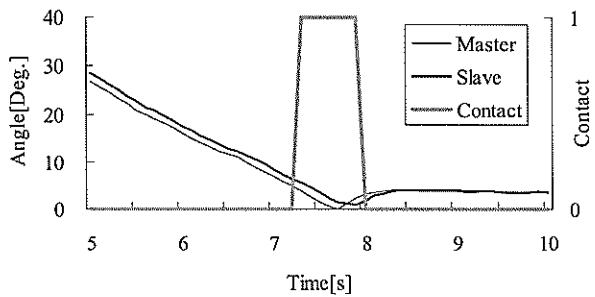
るまでには、この誤差により時間差が出てしまう。UIMD 制御を行わない場合、操縦者の認識時間と把持装置の追従誤差による停止の遅れが積算されて、ブロックの大きな移動の原因となっている事がわかる。操縦者の動作が把持装置の動作速度より速い場合や、把持装置の動作速度が遅く追従性能が悪い場合は、追従誤差が大きくなり、把持対象物の不用意な移動も大きくなる。

UIMD 制御を作用した場合は、接触をセンサで検出してから、旋回が止まるまでの時間が平均 0.08s、把持装置が停止するまでの時間が平均 0.02s であった。UIMD 制御により、把持装置は接触後、即座に停止していることがわかる。図-16 (b) から、UIMD 制御により、接触を検出すると、操作装置の角度にかかわらず把持装置の角度が固定されていることがわかる。この間、操作装置は把持装置の角度になるよう位置制御が掛かり、マスター・スレーブの主従関係が逆転する。

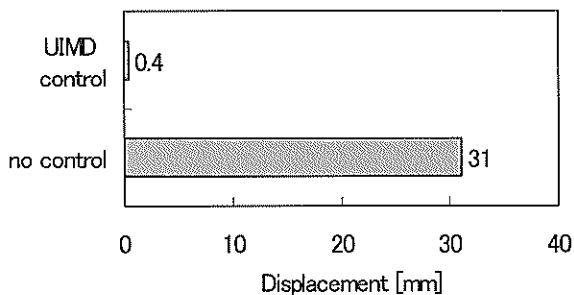
UIMD 制御を作用させることで、把持装置側で停止が掛かるため、操縦者の接触認識時間や、把持装置の追従性能にかかわらず、ブロックの移動量を最小に抑えられるといえる。



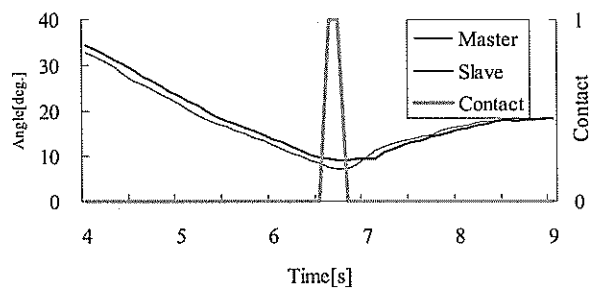
(a) 接触認識と停止時間



(a) 制御なし (No.5)



(b) 移動量



(b) 制御あり (No.5)

図-15 接触実験結果

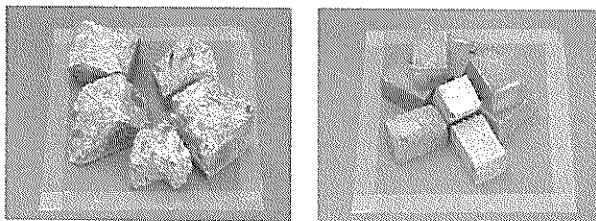
図-16 接触実験結果

5. 把持作業実験

5.1 実験方法

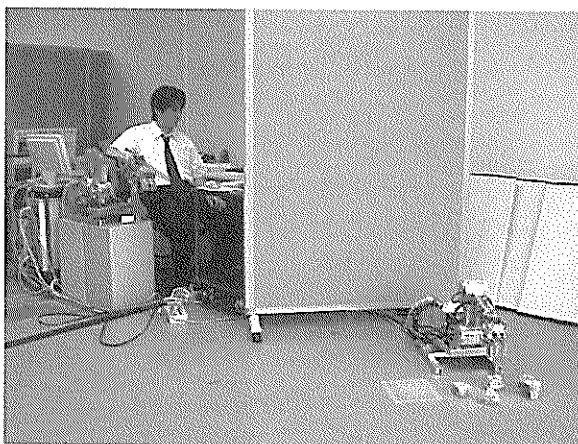
操作支援手法の有効性を検証するため、把持作業実験を行う。把持作業は、把持対象物を掴んで設置領域へ移動する作業である。把持対象物は、図-17 (a) の分散して配置した大きさの異なる5個のコンクリート塊と、同図 (b) の積み重ねた大きさの等しい10個の小型コンクリートブロック (97g, 50mm×30mm×30mm) である。目視による操作と触覚による操作支援を用いた操作の場合で、各条件に対して5回の試行を行う。図-17 (c) のように視覚の遮断は衝立で行うが、音の遮断は行わない。把持作業の評価項目は、

- 1) 作業時間：作業に要した時間。全対象物を移動するのに要した時間と全対象物を移動後に残存物調査に要した時間。対象物を見失った場合は、操縦者が作業を止めた時間とし、平均値には含まない。
- 2) 落下率：把持して持ち上げた個数に対する、途中で落としてしまった個数。
- 3) 領域外率：把持して移動した個数に対する接地領域からはみ出した個数。見失った対象物は含まない。接地領域の線上から半分以上対象物が出ていたら領域外と判定する。
- 4) 移動成功率：把持対象物の全個数に対する移動でき



(a) コンクリート塊

(b) 小型ブロック



(c) 難視界

図-17 把持実験

た個数。設置領域外に出たものも含む。とする。

5.2 実験結果

実験結果を表-2に、平均値のグラフを図-18に示す。また、触覚による操作支援による把持作業の様子を分散配置の場合を図-19に、集積配置の場合を図-20にそれぞれ示す。

実験結果から、目視の場合は、分散配置、集積配置の場合ともに、落下率、領域外は無く、100%の成功率で把持作業を行っている。作業時間も分散の場合平均 87.1s、集積の場合平均 84.4s と作業対象による差は少ない。

一方、触覚による把持作業の場合、落下や、領域外に出る場合や、集積においては、2個のブロックを見失うこともあった (No.3)。全体的には失敗は少なく、分散の場合の移動成功率は平均100%、集積の場合の移動成功率は平均96%であった。いずれの場合も成功率は高く、本操作支援手法が有効であることを示している。図-19, 20から、視点を変えながら的確に把持作業を行っている様子わかる。作業時間は、分散の場合、平均 383.2s と、目視の場合の約4.4倍、集積の場合把持作業時間 532.7s、残存物調査に平均 193.8s、合計 764.5s と目視の場合の約9.1倍となった。図-20 (6) では、この残存物調査を行い、触像地形の色の変化個所が非常に広範囲にわたっていることがわかる。触覚による把持作業では、対象物の状態により大きく作業時間が異なる結果となった。この原因としては、以下のようなことが考えられる。

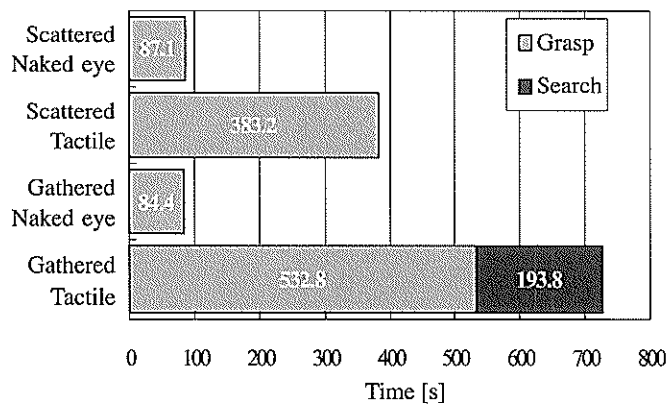
- 1) 触像の視覚化では大まかな形状しか特定できないため、対象物が集積していると、個々の区別が付きにくい。
- 2) 対象物が小型なので見つけにくい。
- 3) 不安定な集積部分は、UIMD 制御を作用しても対象物が崩れて、状況が変化しやすい。
- 4) 密集していると、隙間に指を入れることができない。
- 5) 移動できた個数が分からなくなりやすく、残存数調査を行わねばならない。

こうした、要因により、集積物の把持作業は、著しく時間が掛かる結果となった。

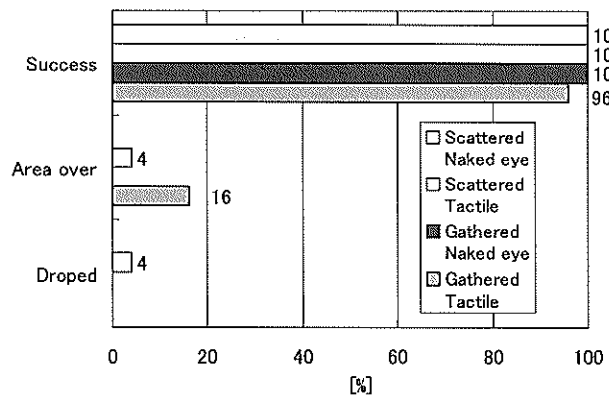
また、操縦者から長時間の操作に伴う疲労感が聞かれた。この疲労感は、装置の調整により和らげることが可能と考えられるが、操作装置の更なる改良が必要である。

表-2 接触実験結果 (* : 作業断念)

Objects state	Operation	No.	Working time[S]		Dropped[%]	Area over[%]	Success[%]
			Grasp	Search			
Scattered	Naked Eye	1	94.1	0	0	0	100
		2	88.5	0	0	0	100
		3	87.5	0	0	0	100
		4	90.9	0	0	0	100
		5	74.6	0	0	0	100
		Aver.	87.1	0	0	0	100
	Tactile	1	418.8	0	20	0	100
		2	404.2	0	0	0	100
		3	286.2	0	0	0	100
		4	396.6	0	0	20	100
		5	410.2	0	0	0	100
		Aver.	383.2	0	4	4	100
Gathered	Naked Eye	1	63.8	0	0	0	100
		2	98.9	0	0	0	100
		3	109	0	0	0	100
		4	80.9	0	0	0	100
		5	69.6	0	0	0	100
		Aver.	84.4	0	0	0	100
	Tactile	1	631.9	83	0	30	100
		2	391	159	0	30	100
		3	*916.5	-	0	0	80
		4	474.1	331	0	0	100
		5	634.1	202	0	20	100
		Aver.	532.8	193.8	0	16	96

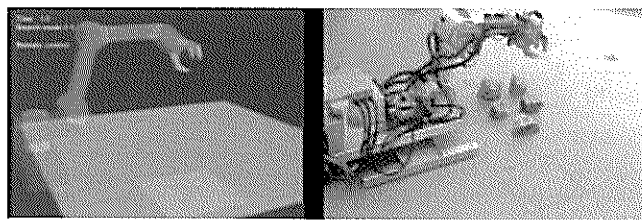


(a) 作業時間

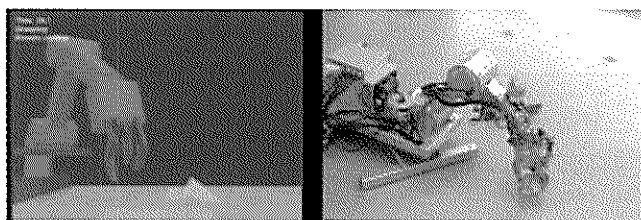


(b) 落下率, 領域外率, 移動成功率

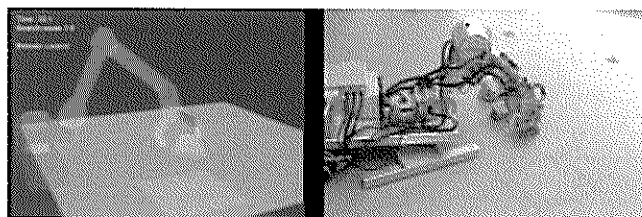
図-18 把持作業実験結果平均値の比較



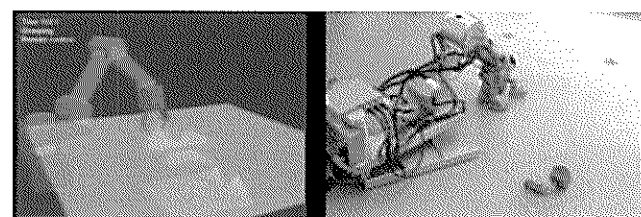
(1)



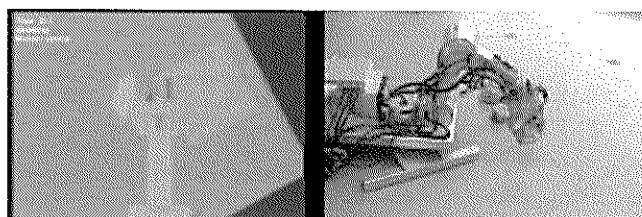
(4)



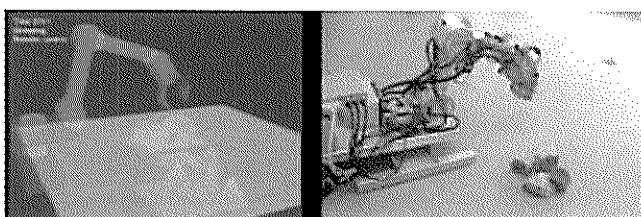
(2)



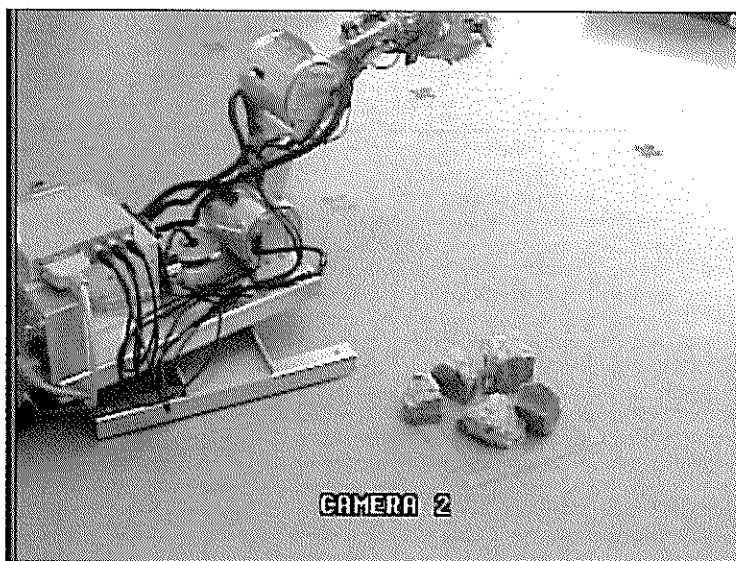
(5)



(3)

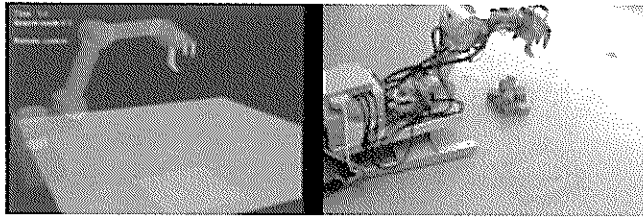


(6)

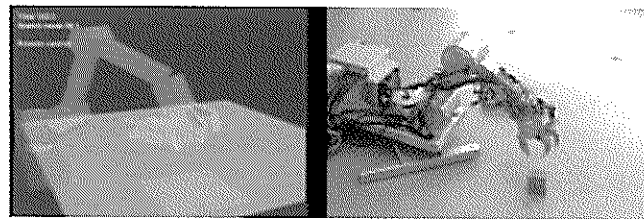


(7)

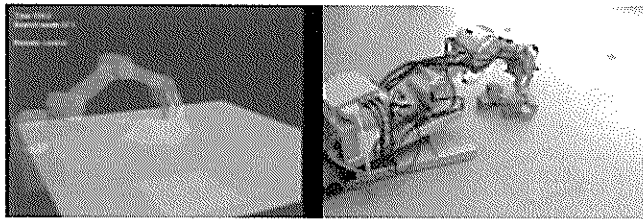
図-19 触覚による把持作業実験の様子 (分散配置 No.3)



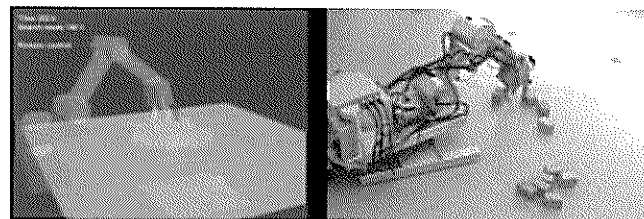
(1)



(4)



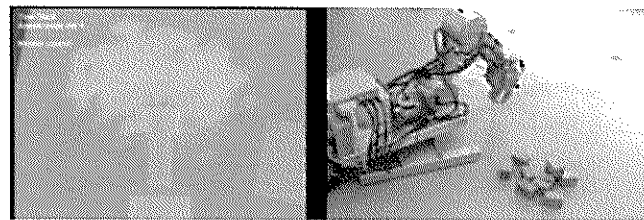
(2)



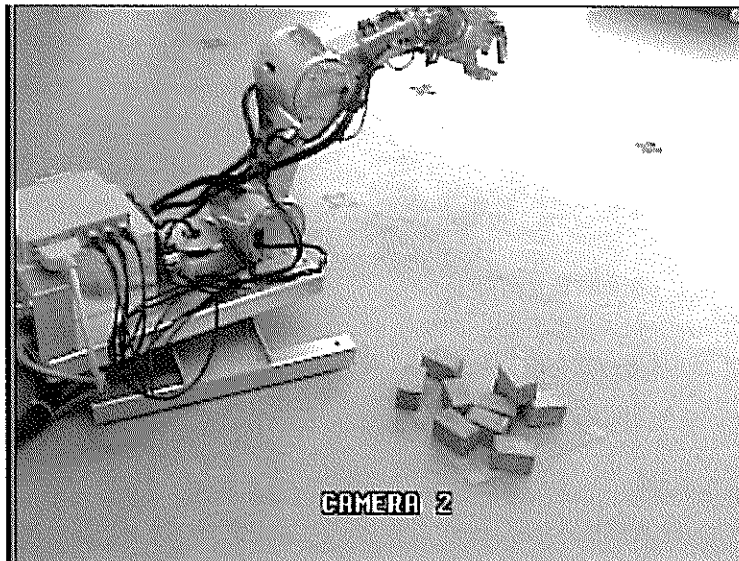
(5)



(3)



(6)



(7)

図-20 触覚による把持作業実験の様子 (集積配置 No.4)

6. 結言

本論文では、難視界時の把持作業に対して、触覚を用いた操作支援手法を提案し、有効性を把持作業実験により確認した。

- 1) 本操作支援手法を用いることで、装置や対象物が見えない場合も、100%に近い移動成功率で把持作業を行えた。
- 2) 接触時に停止制御を行う UIMD 制御を用いることで、対象物の不用意な移動を最小限に避けられる。
- 3) 目視において作業効率は、対象物の設置状態に依らないが、触覚による把持では、対象物の状態に大きく左右される。
- 4) 複数の対象物が集積している場合、触像の視覚化では、個々の対象物の識別ができないため、把持作業の効率は低くなる。
- 5) 対象物の個数が多いと、操縦者は残存数の把握が難しくなり、残存数の調査が必要となるため、作業時間を延ばしてしまう。
- 6) 相似形の操作装置は、操作は簡単ではあるが、長時間使用すると疲労感がある。

本研究により、難視界時の把持作業の実現性は高まったが、作業効率は良いとは言えない。今後、作業効率を向上し、長時間の作業に対応するには、

- 1) 超音波測深等で対象物の作業前の状態と作業後におけるブロックの残存数の提示を行う。
 - 2) 複数の対象物間の隙間を検出する方法の開発。
 - 3) 操作の疲労感を和らげる。
- 等が必要となる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、施工・制御技術部研修生 山本恭氏（佐伯建設工業）に実験装置の操縦者として御協力をいただきました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 源雅彦：遠隔操作ロボットの開発 - 迅速で効率的な災害復旧作業を目指す -，建設機械12月号，2001，pp.55-58.
- 2) 国土交通省大臣官房調査課：ロボット等による IT 施工システムの開発，建設物価臨時増刊，1月号，2003，pp.1-3.
- 3) 金山裕幸：上川口港防波堤工事での「水中バックホウ・ビッグクラブ」による施工例，建設の機械化 3

月号，2000，pp.44-49.

- 4) Masaki ISHII, Shinkichi OSHIRO, Takayoshi ITOH: The Development and Utilization of the "Underwater Backhoe," a Multifunctional Underwater Construction Machine, IEEE Proc. of the 2000 Int. Sympo. on Underwater Technology, 2000, pp.319-322.
- 5) 白井一洋, 吉江宗生, 佐藤栄治: 超音波ホログラフイーによる水中視認技術, 港空研資料, No.1009, 2001.
- 6) Edward Belcher, William Hanot, Joe Burch: "Dual-Frequency Identification Sonar", IEEE Proc. of the 2002 Int. Symp. on Underwater Technology, 2002, pp.187-192.
- 7) 内海真, 平林丈嗣, 吉江宗生他: 反力情報を用いた遠隔操作型水中施工ロボットの提案, テクノ・オーシャン 2000 論文集, 2000, pp.399-404.
- 8) 内海真, 平林丈嗣, 吉江宗生: AR を用いた遠隔操作型水中把持システムに関する研究, 第19回ロボット学会学術講演会予稿集, 2001, pp.25-26.
- 9) 内海真, 平林丈嗣, 吉江宗生, 難視界時の把持作業における拡張現実感 (AR) を用いた視覚補完手法, 港空研報告, Vol.41, No.2, 2002, pp.153-173.
- 10) Makoto UTSUMI, Taketsugu HIRABAYASHI, Muneo YOSHIE, Development for Teleoperation Underwater Grasping System in Unclear Environment, IEEE Proc. of the 2002 Int. Symp. on Underwater Technology, 2002, pp.349-353.
- 11) 内海真, 平林丈嗣, 吉江宗生, 難視界に対応した把持システムの視覚補完手法, 第9回建設ロボットシンポジウム論文集, 2002, pp.169-176.
- 12) 内海真, 酒井浩, 秋園純一, 難視界に対応した把持システムの把持作業実験, ROBOMECH '03 講演論文集, 2003, 1A1-2F-A1.
- 13) 羽賀正和, 藤島一雄, 富田禎久: "油圧ショベルのオペレータ支援機能", 建設機械12月号, 2001, pp.36-39.
- 14) 谷本充隆, 新井史人, 福田敏男, 高橋郁夫, 根来真: 遠隔治療システムにおける力覚呈示による安全性・操作性の向上, 日本機械学会論文集 C, Vol.66, No.647, 2000, pp.2331-2338.
- 15) 尹祐根, 妻木勇一, 内山勝, 小田光茂, 土居利次: ETS-VII 搭載マニピュレーターの遠隔操作時におけるマスタスレーブ方式とジョイスティック方式の比較, 日本機械学会論文集 C, Vol.67, No.662, 2001, pp.3219-3226.

- 16) 山田宏尚, 武市教児, 武藤高義: 遠隔操作建設ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御, 日本機械学会論文集 C, Vol.66, No.651, 2000, pp.3364-3671.
- 17) 加藤恵輔, 広瀬茂男: 形状帰還型マスタ・スレーブアームの提案と基礎実験 (人道的地雷撤去ロボットへの適用可能性の検討), 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5, 2000, pp.752-757.
- 18) 川崎晴久, 内山和直, 小松恒夫: “研究用プラットフォームをめざした分布型触覚センサを有する人間型ロボットハンド”, 日本機械学会論文集 C, Vol.66, No.651, 2000, pp.3672-3678.
- 19) 前野隆司, 広光慎一, 河合隆志: 曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, 2001, pp.91-99.

$${}^5T_7 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_7) & 0 & \sin(\theta_7) & l_h \\ 0 & 1 & 0 & -l_{hy} \\ -\sin(\theta_7) & 0 & \cos(\theta_7) & l_{hz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_8 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_8) & 0 & \sin(\theta_8) & l_h \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_8) & 0 & \cos(\theta_8) & -l_{hz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$l_4 = [l_4, 0, 0, 1]^T$$

$$l_h = [l_h, 0, 0, 1]^T$$

$$l_f = [l_f, 0, 0, 1]^T$$

(2) 逆運動学

アーム部は先端位置を与えることで制御する。アーム部の各関節角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は、逆運動学により以下のように求める。

付録

本把持装置、操作装置の各部の座標位置を求める運動学計算と、アーム部への目標位置から各関節の角度を求める逆運動学計算を記す。

(1) 運動学

付図-1のリンクモデルにおいて把持装置のアーム部先端座標 p_a , ハンド部中心座標 p_h , 指1, 2, 3の指先座標 p_{f1}, p_{f2}, p_{f3} は、座標系 Σ_j から Σ_i への同時変換行列 T_i , 関節 i の角度を θ_i とすると、運動学により以下のように計算する。

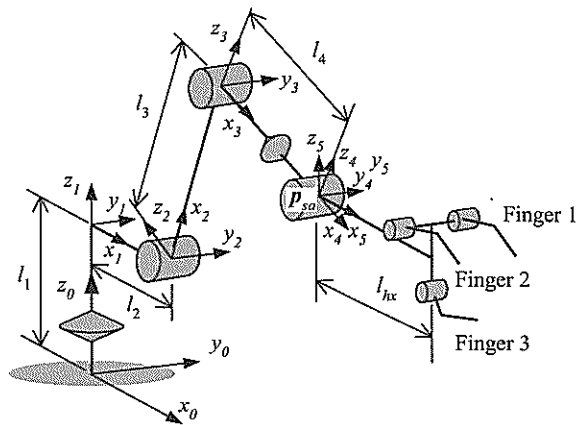
$$\left. \begin{aligned} [p_a, 1]^T &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 l_4 \\ [p_h, 1]^T &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 l_h \\ [p_{f1}, 1]^T &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 l_f \\ [p_{f2}, 1]^T &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^5T_6 l_f \\ [p_{f3}, 1]^T &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^5T_6 l_f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし,

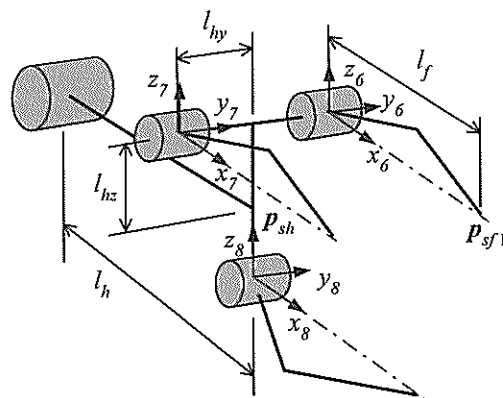
$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3) & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_4 \\ 0 & \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & \sin(\theta_5) & l_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & 0 & \sin(\theta_6) & l_h \\ 0 & 1 & 0 & l_{hy} \\ -\sin(\theta_6) & 0 & \cos(\theta_6) & l_{hz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



(a) 全体



(b) ハンド部

付図-1 把持装置リンクモデル

付図-2において、 θ_1 は、

$$\theta_1 = \text{atan2}(p_{ay}, p_{ax}) \quad (2)$$

で求まる。 L は

$$\begin{aligned} l_x &= \sqrt{p_{ax}^2 + p_{ay}^2} - l_2 \\ l_z &= l_1 - p_{ax} \\ L &= \sqrt{l_x^2 + l_z^2} \end{aligned}$$

であるから、 α は、

$$\alpha = \text{atan2}(l_z, l_x)$$

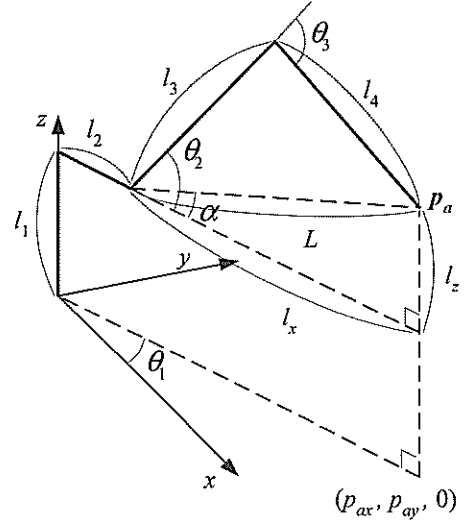
となる。 θ_2 は、

$$\theta_2 = \alpha - \arccos\left(\frac{l_3^2 + L^2 - l_4^2}{2l_3L}\right) \quad (3)$$

θ_3 は、

$$\theta_3 = \pi - \arccos\left(\frac{l_3^2 + l_4^2 - L^2}{2l_3l_4}\right) \quad (4)$$

で求まる。



付図-2 逆運動学モデル