

独立行政法人港湾空港技術研究所

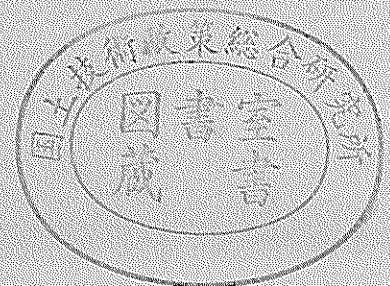
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.41 NO.2 June 2002

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 41 卷 第 2 号 (Vol. 41, No. 2), 2002 年 6 月 (June 2002)

目 次 (CONTENTS)

1. 複素主成分分析を用いた仙台湾蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性の解析
..... 内山雄介・栗山善昭 3
(A Complex Principal Component Analysis on Medium-term Morphological Behavior of an Exposed Sandy Beach
before Gamo Lagoon at Sendai Coast, Japan
..... Yusuke UCHIYAMA, Yoshiaki KURIYAMA)
2. 高潮推算に用いる台風の気圧と風の場に関する検討
..... Albena Veltcheva・河合弘泰 23
(Investigation of the Typhoon Pressure and Wind Field with Application for Storm Surge Estimation
..... Albena VELTCHEVA, Hiroyasu KAWAI)
3. 大阪湾洪積粘土の構造の評価と力学特性
..... 土田 孝・渡部要一・姜 敏秀 45
(Evaluation of structure and mechanical properties of Pleistocene clay in Osaka Bay
..... Takasi TSUCHIDA, Yoichi WATABE, Min-Soo KANG)
4. サンドコンパクションパイル工法による砂質地盤の締固めの設計法に関する考察
..... 山崎浩之・森川嘉之・小池二三勝 93
(Study on Design Method for Densification of Sandy Deposits by Sand Compaction Pile Method
..... Hiroyuki YAMAZAKI, Yoshiyuki MORIKAWA, Fumikatsu KOIKE)
5. 溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用
..... 山崎浩之・善 功企・河村健輔 119
(Study on Applicability of Permeable Grouting Method to Countermeasure against Liquefaction
..... Hiroyuki YAMAZAKI, Kouki ZEN, Kensuke KAWAMURA)
6. 難視界時の把持作業における拡張現実感 (AR) を用いた視界補完手法
..... 内海 真・平林丈嗣・吉江宗生 153
(Vision Supplement for Grasping in Unclear Underwater Using AR
..... Makoto UTSUMI, Taketsugu HIRABAYASHI, Muneo YOSHIE)

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

内海 真*
平林 文嗣**
吉江 宗生***

要 旨

港湾工事では、捨石均し等多くの作業を潜水士による人力施工に頼っている。こうした作業は海中の厳しい環境下で行われ、効率と安全性向上の面からも機械化が必要とされている。このような現状において、水中バックホウに各種アタッチメントを取り付けて使用することにより、作業の汎用性を増し、水中施工の機械化が進むと考えられる。中でも把持装置を取り付けることで、根固めブロックや捨石、被覆石の移動や敷設、破損した異形ブロックや被災した港湾構造物の解体・撤去作業に活用できるようになる。

地上において、遠隔操作はビデオや目視による視覚情報で、把持を行うことができる。しかしながら、海中では泥や砂の巻上げによる濁りで、視覚が得られなくなる。これにより、把持対象物の形状や重心位置を認識することが難しく水中における把持作業の効率は低下してしまう。そこで、拡張現実感 (AR: Augmented Reality) の方法を把持システムに適用することを考えた。AR手法により、拡張、加工した複数の情報を用いて欠損した視覚の補完を行う。本把持システムでは、この補完のための情報として、力覚や触覚を選択した。この力覚や触覚を用いてバイラテラル (双方向) 制御系を構成し、操作者に対して、手で把持したような感覚を伝達する。さらに、触覚によるイメージである触像の視覚化を行う。ハンドの指が構造物に触れたとき、ディスプレイ上のその接触点に多面体: 触像体を描画する。触像体を用いることで操縦者は簡単に物体の形状や重心位置を推測することができる。この手法の有効性を確認するため、シミュレーションプログラムを開発し被験者による把持作業実験を行った。この把持作業実験により、ARを用いた視覚補完手法の有効性が明らかになった。

キーワード: 把持システム, 触像体, Augmented Reality, 水中施工, 把持作業, 遠隔操作

* 制御技術研究室研究官

** 情報化技術研究室研究官

*** 施工技術研究室長

〒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

Vision Supplement for Grasping in Unclear Underwater Using AR

Makoto UTSUMI*
Taketsugu HIRABAYASHI**
Muneo YOSHIE***

Synopsis

In construction of harbor, most works depend on divers. These works are very hard and dangerous. Considering the efficiency and safety, it is necessary to introduce underwater construction machine. In these present circumstances, installing various type attachments to underwater backhoe increases a wide use of underwater works and develops a mechanization of underwater construction. Especially, teleoperation underwater backhoe with grasping system is useful for setting and removing of brocks or rubbles, dismantlement of broken facilities.

On the ground, it is able to use a video or eyes vision for teleoperation. However, in underwater, muddiness caused by raising earth and sand disturbs vision. It is difficult to recognize the shape and the center of gravity (COG) of a structure. The efficiency of a grasping operation in water deteriorates.

Therefore, it is considered that the Augmented Reality (AR) method is applied to the grasping system. In AR method of this research, plural information that is extended or processed compensate for lack of visual information. For this compensation, reaction force and tactile sense is selected and force feedback bilateral control master-slave system is constructed. Reaction-forces and tactile sense give the operator a feeling of grasping. Furthermore, utilize these forces for visualization of haptic image. When fingers of the hand touch a structure, a polygon at the touched point is drawn on the display. This polygon is called "Haptic image object". Using this "Haptic image object", the operator can understand the shape and COG of the structure easily.

It became clear that the visualization of haptic image is effective for the grasping operation in poor vision by examinee experiments in a computer simulation. And we developed a master-slave hand models for a next step experiment. In this paper, we present AR method and a validity of this teleoperation system in underwater.

Key Words: Grasping system, Haptic Image Object, Augmented Reality, Underwater construction, Grasping work, Teleoperation

* Research Engineer of Control Systems Division, Construction and Control systems Department
** Research Engineer of Applied Information Technology Division, Construction and Control systems Department
*** Construction Equipment Division Head
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-0468-445062 Fax : +81-0468-440575 e-mail : utsumi@pari.go.jp

目 次

要 旨	153
1. まえがき	157
2. AR 手法の適用	157
2.1 反力の伝達 (バイラテラル制御)	158
2.2 反力の視覚化	158
2.3 触像の視覚化	158
3. 把持作業シミュレーション	159
3.1 システム構成	159
3.2 操作装置	160
3.3 ハンド (把持装置)	160
3.4 ハンドの姿勢計算	161
3.5 ハンド (指) の運動方程式	161
3.6 制御系の構成	161
3.7 接触	162
3.8 摩擦の計算	162
3.9 触像体構成の条件	162
4. 把持作業シミュレーション実験	163
4.1 実験方法	163
4.2 評価方法	163
4.3 実験結果	164
5. あとがき	167
謝辞	167
参考文献	167
付録 各被験者の把持作業実験結果	168

1. まえがき

港湾工事では、捨石均し等多くの作業を潜水士による人力施工に頼っている。こうした作業は海中の厳しい環境下で行われており、効率と安全性の面からも機械化が必要とされている。このような現状で、水中バックホウを捨石均しの作業に導入することにより、効率と安全性の向上が成されている¹⁾。水中バックホウに陸上のバックホウと同様に各種アタッチメントを取り付けることで、作業の汎用性が増し、水中施工の機械化が進むと考えられる。特に把持装置を取り付けることで、根固めブロックや捨石、被覆石の移動や敷設、破損した異形ブロックや被災した港湾構造物の解体・撤去作業に活用できるようになる。

物体を把持する場合に重要なことは、把持対象物の重心位置の認識、把持の確認と、把持中における対象物の状態の監視である。重心位置から外れて物体を掴むと、不安定であり、物体を落としやすい。陸上の作業ではこうした判断は目視で行うことができるため作業は難しいものではない。

しかしながら、水中では濁りや土砂の巻き上げにより視覚が損なわれやすい。水中の透明度が5m以下程度になると、ブームの先端が見えなくなり、把持の状況が確認できないため作業は困難になる。

また、現在の水中バックホウは、潜水士が直接乗り込み水中で作業を行っている。このため、作業時間を長く取ることは難しい。そこで作業時間の延長とさらなる安全性向上の面からも、水中バックホウをケーソンや作業台船上から遠隔操作することが必要である。

遠隔操作に関しては、近年、被災地の復旧などに使用するために建設機械の遠隔操作に関する研究が盛んになってきている^{2), 3)}。また、地雷探索・撤去作業に使用するロボットの遠隔操作手法の研究も行われている⁴⁾。これら陸上の遠隔操作ではTVカメラの画像により操作を行うことを前提としており、難視界に対応した遠隔操作の研究は行われていない。

そこで我々は、水中施工機械やロボットの新たな遠隔操作手法として拡張現実感 (AR: Augmented Reality) の概念を取り入れ、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^{5) ~8)}。遠隔操作でよく用いられるVR (Virtual Reality) 技術が、視覚は視覚、音は音として、ありのままの情報を遠隔地の人間に伝達する方法であるのに対して、ARでは、複数の情報を人間がより理解しやすいように加工、拡張する。ARは視覚を音に、力覚を視覚に変換する、あるいは複数の情報を合成するといったことも含んでいる。

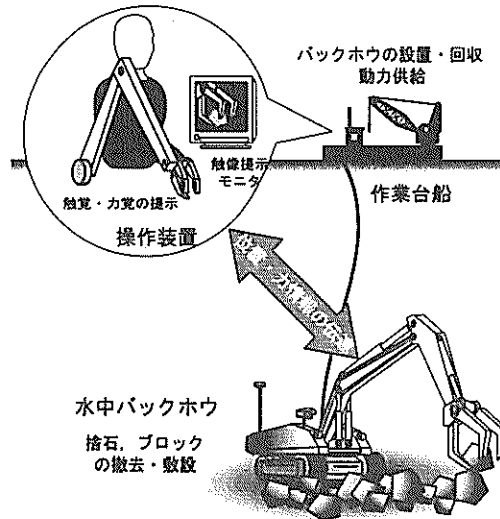


図-1 水中把持作業イメージ

本研究は、視覚が得られない場合の遠隔操作の把持作業を主眼においた。把持装置の形状やメカニズムそのものを研究するのではなく、AR手法を用いた視覚の補完や制御システムの研究を進めていく方針である。図-1に遠隔操作把持作業のイメージを示す。研究全体の計画としては、コンピュータによるシミュレーション実験を行い、ついで模型実験、小型試作機、実機という順で研究を進めていく。

本論文では、まず、難視界時の把持に対応するためのAR手法に関して検討した。ついで、このAR手法を検証するためのコンピュータ・シミュレーションプログラムの開発を行った。このシミュレーション環境を用いて被験者による把持作業実験により本手法の有効性を確認した。

2. AR手法の適用

人間が暗闇で物体を掴む場合、手探りで物体を探し、このとき得た情報を頭の中でイメージ化して物体の形状を推測する。また、この形状イメージと掴んだときの反力の感覚で重心位置等を推測し、安定して物体を持ち上げることができる。人間は触覚と力覚、およびそれらを元にしたイメージによって、視覚に頼らなくとも把持作業を確実に行うことができる。そこで、このような人間の推測方法を応用して、視覚が乏しい場合の把持作業において、複数の情報を加工、拡張し組み合わせて利用することで、欠落した視覚情報を補完することを考えた。本研究では、反力の伝達、反力の視覚化、触覚の視覚化の3方法を組み合わせ

て視覚情報の補完を行う。

2.1 反力の伝達 (バイラテラル制御)

把持装置が把持した感覚を操作者に伝達できるように、バイラテラル (双方向) 制御を用いる。把持装置に、力覚センサや触覚センサを取り付け、これらのセンサで取得した力を操作装置に取り付けたモータで操作者の手に提示する (図-2)。これにより、操縦者は、物体を掴んだときの反力を感じることができる。

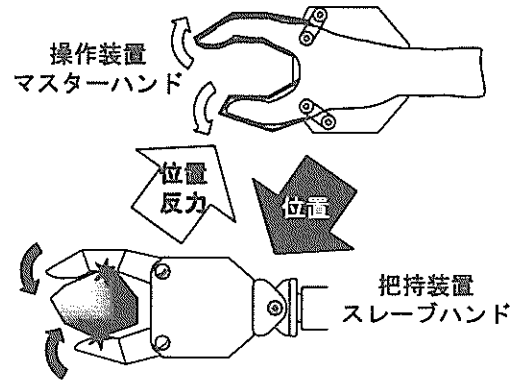


図-2 反力の伝達

2.2 反力の視覚化

把持装置に取り付けた力覚センサは、コンクリートブロックなどを把持するため、数トン以上の非常に大きな力をうけるが、操作者にこの力を直接伝達することはできないため、力の縮小が必要になる。このとき、物体との接触のような比較的小さな力も縮小されるため、操作者は物体との接触を認識することができなくなる。

そこで、モニタに描画する把持装置の色を作用力によって変化させることで、視覚的に反力を認識できるようにする。

提示すべき情報としては、把持装置各指の接触の有無と把持力、重力方向に作用する力である。

各指が物体と接触していない場合は、指をグレーで描画し、何らかの物体と接触し、反力を受けた場合に描画色を赤に変化させる。さらに、反力が大きくなるに従い赤みを強くする。

物体を掴み持ち上げた場合、各指の重力方向に作用する力を提示するブロックを各指につけて描画する。無負荷時には指と同じくグレーで描画し、重力方向下に力が作用したときには赤く、上に作用したときは緑で描画する。この色も力の大きさに比例して色味を変化させる。物体の重心位置を中心として把持できていない場合は、各指に作用する力の大きさや方向にばらつきを生じる。これにより、重力方向作用力提示部の色もばらつくため、操作者は直感的に把持位置のずれを理解することが可能となる。

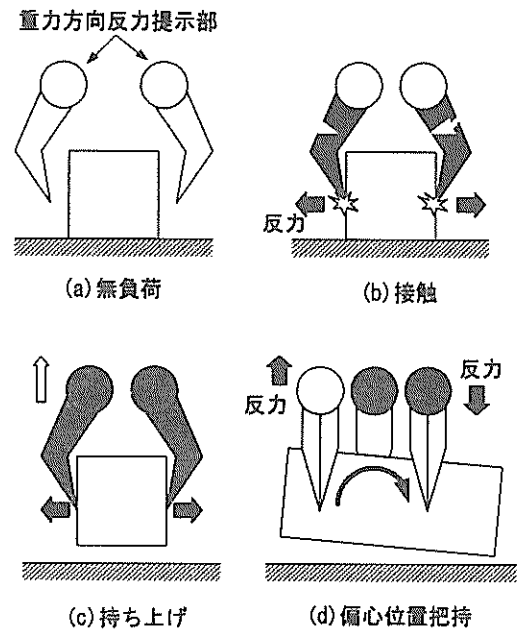


図-3 反力の視覚化

2.3 触像の視覚化

反力を伝達し、視覚化することで、物体との接触などがある程度は、理解できるが、実際に自分の手で触る場合とは違い、対象物のイメージは作りにくく不明瞭である。そこで、実際にロボットハンドが触った場所をコンピュータの画面上に描画することで像を作り、作業の助けとする触象の視覚化を行う。このとき作成された像を“触像体” (Haptic Image object) と呼ぶ。

触像体の作成方法としては、把持対象物を地面と区別すること、描画する頂点数を少なくできる特徴から、ハン

ドが触った点を頂点として多面体を作成する方法を用いる。ただし、現時点では研究の初期段階でもあり、触像の視覚化の有効性検証に主眼を置くことと、シミュレーション計算の負荷軽減から、触像体で表現する対象物の形状は凸多面体に限る。より複雑な形状の凹多面体は凸多面体を組み合わせるなどして表現可能であると考えられる。

まず、最初にハンドが対象物を把持したときに、核となる小さな三角形4面体を作成する (図-4 (1))。次に、このとき接触した点を新たな頂点として4面体に追加し、最初の触像体 HI を構成する。この方法であれば、最初に接触した点が2点であっても、最初の触像体を作ることができる。この頂点追加アルゴリズムに関して、触像体 HI が n 個の頂点を持つ状態で説明する。

n 個の頂点を持つ触像体 HI の頂点リスト V_i を

$$Vt = \{vt_1, vt_2, \dots, vt_n\} \quad (1)$$

HIの平面リスト Ft を

$$Ft = \{ft_1, ft_2, \dots, ft_{2n-4}\} \quad (2)$$

とする。

触像体の作成は以下の手順で行う。

- 1) ハンドが把持対象物に接触したとき, HIのある k 番目の平面 ft_k に属する1番目の頂点 vt_j から vt_{n+1} へのベクトル a_w を引く(図-4 (3)).

$$a_w = vt_{n+1} - vt_j \quad (3)$$

- 2) 式(4)を用い a_w と平面の法線 n_{fk} の角が 90° 未満なら ft_k が可視であると判断する。

$$\cos^{-1} \left(\frac{a_w \cdot n_{fk}}{|a_w|} \right) < \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

- 3) すべての平面について可視, 不可視を調べ(図-4(4)), 可視面と不可視面が隣接する辺から, 可視境界凸包の頂点リスト Vt_r を作る (図-4 (5)).
- 4) 頂点リスト Vt に Vt_{n+1} を追加する。
- 5) 可視面のうち隣接する平面がすべて可視の場合, その平面に属する頂点は頂点リスト Vt より消去する。可視面を平面リスト Ft から消去する。境界頂点リスト Vt_r と新しい頂点 vt_{n+1} から平面を作り, 平面リスト Ft に追加する。(図-4 (6))

この作業を繰り返すことにより触像体 HI が次第に把持対象物の形状に近づいていく。

3. 把持作業シミュレーション

前章で考えた AR 手法を検証するために, 把持作業シミュレーションのプログラムを製作した。コンピュータを用いて仮想世界をつくり, その中でコンピュータグラフィクス (CG) の3指把持装置を外部 (実世界) の操作装置を用いて操作し, 把持実験を行う。シミュレーションはリアルタイム物理シミュレーションである。物理的現象としては, 物体の落下, 物体の接触を再現できる。シミュレーションプログラムの実行画面を図-5 に示す。仮想世界の構成要素は, 把持装置であるハンド, 地面, 把持対象物であり, 地面は平面, 把持対象物体は1個の凸多面体とする。画面は俯瞰, 上面, 側面からの様子を提示し, 俯瞰図はズームイン・アウトや視点の変更が可能である。

3.1 システム構成

実験装置の構成を図-6 に, ハンドと操作装置の構成を図-7 に示す。実験装置は操作装置と操作装置制御用コンピュータ, シミュレーション計算用コンピュータからなり, これらを UDP-IP, 100BASE-T の LAN 回線で接続している。シミュレーション画像は計算用コンピュータ側のモニターで表示する。操作装置制御用コンピュータからは, 指先の位置情報とコマンドを送信する。シミュレーション用

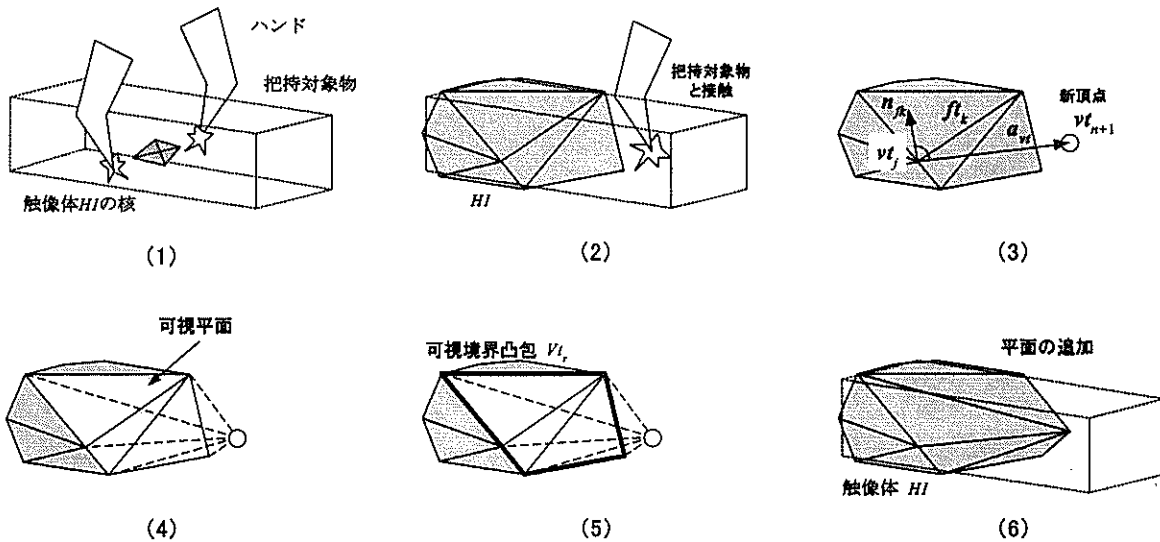


図-4 触像の視覚化

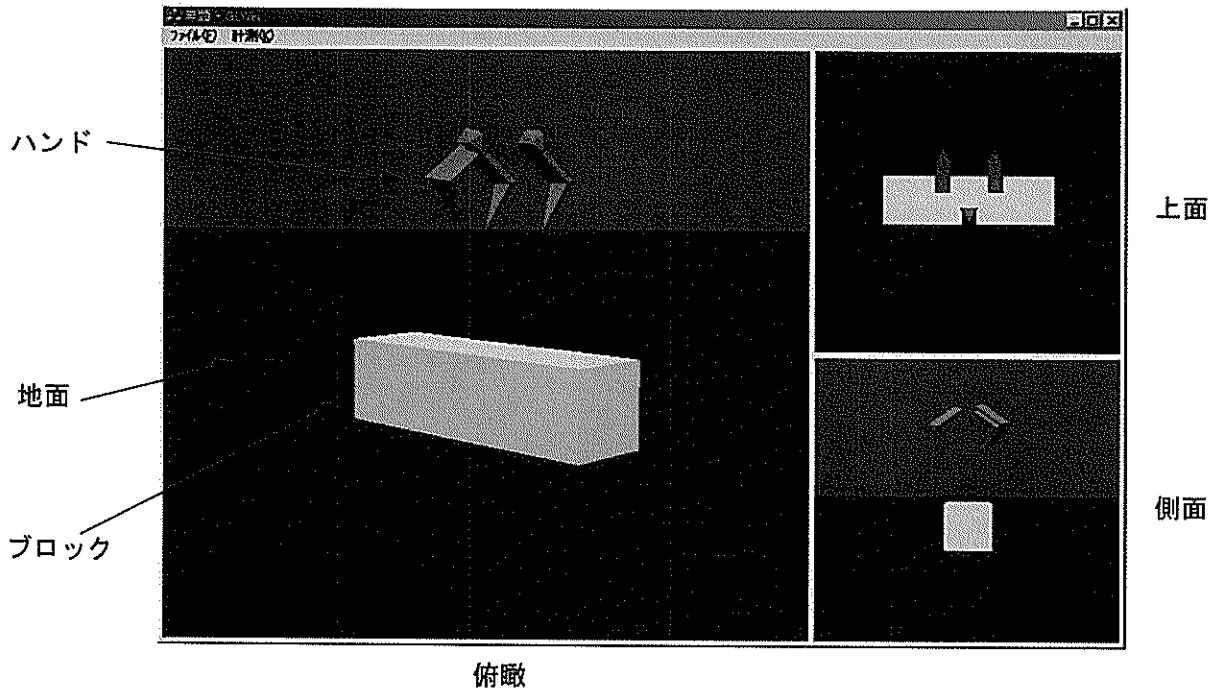


図-5 シミュレーション画面

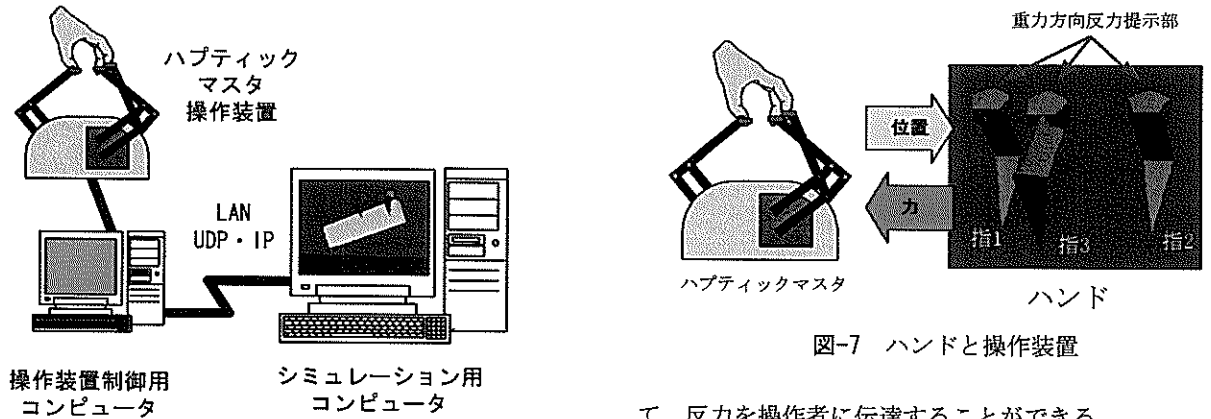


図-6 シミュレーションシステム

コンピュータは、シミュレータ内でハンドを位置制御し、その動作により得られた反力を送信する。本システムは位置指令力帰還型のマスタ・スレーブシステムとなっている。

3.2 操作装置

操作装置は力覚提示型操作装置のハプティックマスタを利用している。ハプティックマスタは3つのリンクユニットを持ち3次元位置の取得と各方向への反力生成が行える。この3つのリンクの先端位置を仮想空間内のハンドの指先位置に対応させ制御する。操作者は3つのリンクに指を固定して操作を行う。仮想空間内のハンドが物を掴み、反力を生じたとき、ハプティックマスタのモータが動作し

て、反力を操作者に伝達することができる。

3.3 ハンド（把持装置）

ハンドの形状はコンピュータの計算負荷の軽減から、3指と重力方向反力提示部の必要最小限の要素とした。3指の描画色は無負荷時にはグレーであるが、負荷が作用すると赤色になり、負荷の増加に比例して明度を強くする。これにより、指の物体との接触や把握力を色で視覚的に提示できる。重力方向反力提示部は、反力の重力方向成分のみを提示する。重力方向下向きに反力が作用した場合赤色に変化し、上向きに反力が作用した場合、緑色に描画色に変化する。これら描画色の明度は反力の大きさに比例する。これにより、把持対象物の傾き等の把持状態を操作者が視覚により理解することが可能である。

3.4 ハンドの姿勢計算

ハプティックマスタを利用した操作装置では、3点の位置しか取得できない。したがって、各指先の位置は決定されるが、ハンドの姿勢は定まらない。そこで、図-8 に示すように指先位置の3点から計算により、ハンドの姿勢を求める。

まず、指 i ($i=1, 2, 3$) の位置ベクトル p_i から平面を構成し法線 n_h を求める。

$$\begin{aligned} a &= p_2 - p_1, \quad b = p_3 - p_1 \\ n_h &= a \times b \end{aligned} \quad (5)$$

また、この3点から、ハンド座標中心位置 C_h を求める。

$$c_h = \frac{p_2 + p_3 + p_1}{2} \quad (6)$$

また法線 n_h と中心位置からハンド座標となる姿勢マトリクス R_h を求める。 x_h, y_h, z_h をハンド座標単位ベクトルとすると

$$R_h = [x_h \quad y_h \quad z_h] \quad (7)$$

$$x_h = \frac{r}{|r|}, \quad z_h = \frac{n_h}{|n_h|}, \quad y_h = x_h \times z_h \quad (8)$$

ただし

$$r = p_1 - c_h$$

である。

この座標中心位置 C_h と姿勢マトリクス R_h をハンド描画時の基準とし座標変換を行う。

3.5 ハンド (指) の運動方程式

ハンドの指先は、操作装置の位置と直接対応するため、

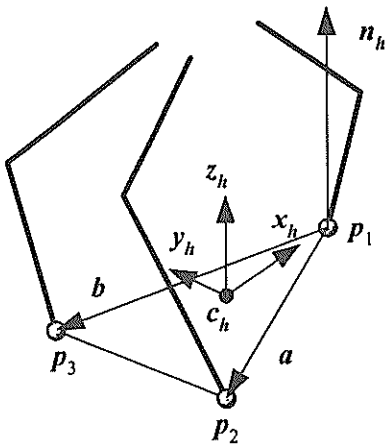


図-8 ハンド姿勢の計算

操作装置で取得した位置をそのまま仮想空間内で指先の位置とすることもできる。しかしながら、操作装置からの位置指令は、サンプリングタイムを要する離散的なものであり、仮想空間内では移動量などのスケールも拡大される。仮想空間内では、指先が瞬間的に大きく移動し、反力が急激に変化する。操作装置のノイズによる値のぶれにも反応してしまうため、安定して把持を行うことが困難となった。

そこで、計算負荷も考慮しつつ、指先にだけに質点を設定し、並進運動だけを考え、運動方程式を立てる。また、指先の振動を抑制するため、粘性摩擦を作用させる。

指の運動方程式のブロック図を図-9 に示す。指 i ($i=1, 2, 3$) の質量を m_i 、位置ベクトルを p_i 、外力を f_i 、駆動力 τ_i 、粘性抵抗係数を c とすると

$$m_i \ddot{p}_i = f_i + \tau_i - c \dot{p}_i \quad (9)$$

となる。

3.6 制御系の構成

システム全体の制御ブロック図を図-10 に示す。ハンドの指は x, y, z 方向に対して位置制御する。指 i の目標位置を p_{ri} 比例制御ゲインを k_p とすると

$$\tau_i = k_p (p_{ri} - p_i) \quad (10)$$

となる。

把持対象物を手探りで探索するとき、ハンドが把持対象物に接触したときに把持対象物を移動してしまい、対象物を見失うという問題が生じた。そこで、探索時にはモードセクタで把持装置の出力切り替えを行う。探索モード時に、外力がある一定以上となった場合、式(10)で求めた駆動力にリミッタを加えて出力を制限する。また、ハンドの出力を制限すると、操作者に伝達する反力が小さくなってしまふ。探索モード時には反力の伝達係数を切り替え、操作者に物体との接触などの力が伝わるようにする。

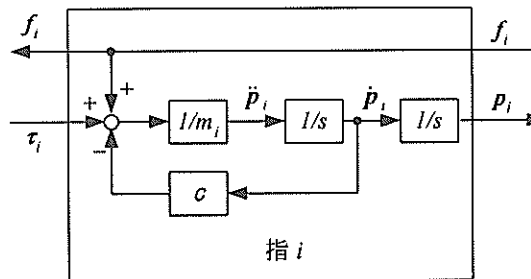


図-9 指モデルのブロック図

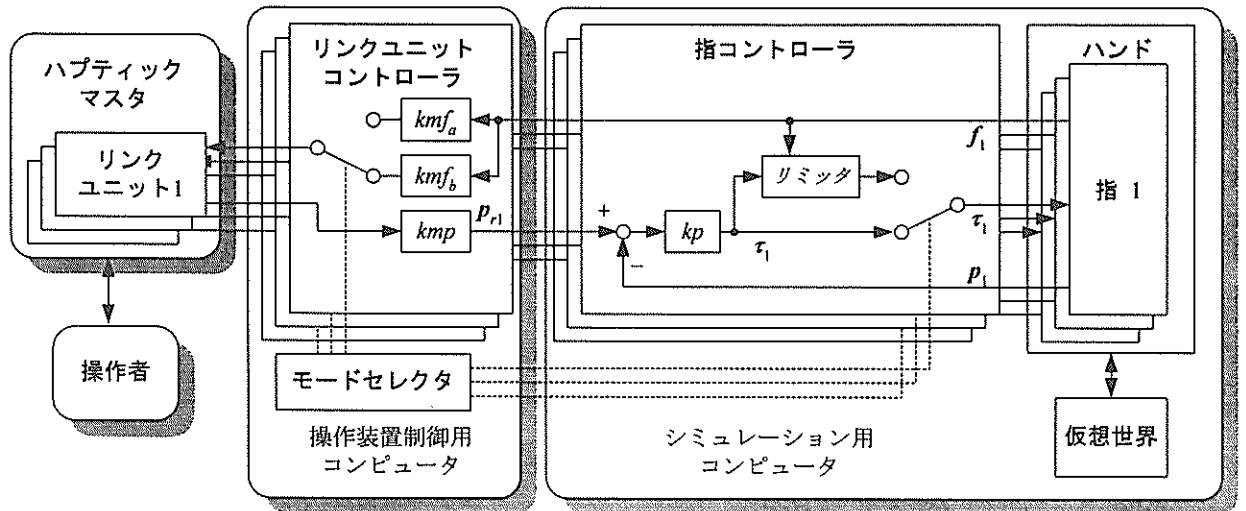


図-10 制御系の構成

3.7 接触

物体との接触は粘弾性接触をシミュレートする. 図-11に示すように接触の計算は頂点と平面で行う. 対象とする頂点が, 多面体の中に入ったらこれを判定する. 接触が判定されたら, 平面の法線方向に衝撃力を作用させる.

反力を F_r , 摩擦力を F_f , 衝撃力を F_c , とすると定常接触時は

$$F_r = F_n + F_f \quad (11)$$

衝突時はこれに衝撃力を付加し,

$$\begin{aligned} F_r &= F_n + F_f + F_c \\ F_c &= k_c v_d \end{aligned} \quad (12)$$

を用いる.

ただし

$$\begin{aligned} F_n &= k_f d_v + k_c v_d \\ d_p &= p_{vt} - p_c \\ d_v &= (n_f \cdot d_p) n_f \\ v_d &= \dot{p}_{vt} - \dot{p}_c \\ v_v &= (n_f \cdot v_d) n_f \end{aligned} \quad (13)$$

v_d : 相対速度, p_c : 平面の衝突点, p_{vt} : 頂点, d_v : 鉛直方向の移動ベクトル, d_h : 水平方向の移動ベクトル, d_v : 接触点からの移動ベクトル, n_f : 平面の法線ベクトル

3.8 摩擦の計算

摩擦力は動摩擦と静摩擦を作用させる. 接触点が移動したとき平面に平行に静摩擦を作用させる. 移動量があ

る値を超えたときに, 動摩擦を作用させ, 接触点の原点を変更する.

接点の原点からの移動ベクトルを d_h , 限界移動量 d_{max} とするとき, 摩擦力 F_f は

$|d_h| \leq d_{max}$ のとき静摩擦係数を k_s とすると,

$$F_f = k_s |F_r| \frac{d_h}{d_{max}} \quad (14)$$

$$d_v = (n_f \cdot d_p) n_f$$

$$d_h = d_p - d_v$$

$|d_h| > d_{max}$ のとき動摩擦係数を k_d とすると

$$F_f = k_d |F_r| u_h \quad (15)$$

$$u_h = \frac{d_h}{|d_h|}$$

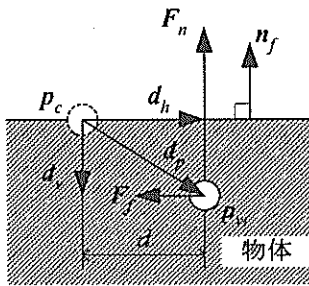
となる. 動摩擦のときは移動前の接触原点 p_{cv} から, 接触原点 p_c を以下のように更新する.

$$p_c = p_{vt} - d_{max} u_h \quad (16)$$

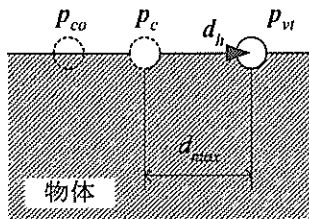
これにより, 常に一定の動摩擦力が接触点に作用する.

3.9 触像体構成の条件

ハンドは仮想世界において, 把持対象物以外の地面にも接触する. 地面に接触した場合は触像体を作ると, 対象物の形が不明確になってしまう. そこで, ハンドが物体を“把持”したことを判定し, このときだけ触像体を構成することとする. また, 物体に触りながらハンドが移動するときは, 常に接触していると判定される. そのままでは, 連続して触像体の頂点が追加されるため, プログラムの実行速度が遅くなってしまふ.“把持”の判定とともに, “解放”



(a) 接触



(b) 接触位置の修正

図-11 粘弾性接触

表-1 実験条件

実験	把持対象物	情報提示手法
1	可視	V
2	可視	V+FF
3	不可視	FI
4	不可視	FI+FF
5	不可視	HI+FI
6	不可視	HI+FI+FF

V : (Vision) 視覚,
 FF (Force Feedback) : 反力の伝達,
 FI (Force Indicate) : 反力の視覚化,
 HI (Haptic Image object) : 触像の視覚化

の判定も行い,新たに把持されたときだけ触像体の構成が行われるようにする.これらの判定条件は以下のようになる.

条件1 操作者の親指に相当する指3とそれ以外の指1,2の両方もしくは,どちらかが一方が物体と接触したときに“把持”とする.

条件2 条件1が満足されないとき,“解放”とする.

4. 把持作業シミュレーション実験

4.1 実験方法

前章のシミュレーション環境で,被験者により把持作業実験を行い,視覚を得られない場合にAR手法を用いた本把持システムが有効であることを確認する.把持作業は物

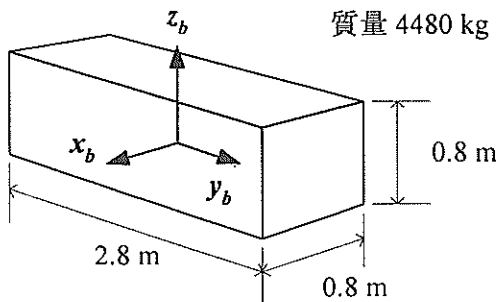


図-12 把持対象物

体を掴んで持ち上げる場所までとする.把持対象物体は図-12に示すようなコンクリートブロックを想定した四角柱で,重さは4480kgである.把持対象物が見える場合と見えない場合について,表-1に示す実験条件で操作者に提示する情報を変え,実験を行う.この6項目の実験条件で各項目を3回ずつ試し実験を行う.被験者は27歳から49歳までの男女10人である.被験者にはすばやく作業することよりも,確実に把持を行うことを重視してもらった.

実験は各項目を連続して行う必要があるため経験的に制限時間を設定した.実験1~4までの制限時間は2分とした.実験5,6では触像体の作成制限時間を2分とし,把持作業の制限時間を2分とした.いずれの実験も被験者がギブアップした場合は途中で終了もしくは,次の作業段階に移行する.

4.2 評価方法

把持システムの評価は以下に示す項目で行う.

- 1) 成功率:物体を持ち上げると2点,把持のみ1点,失敗0点とし,3回の試行の合計点を最高点6点で割り,作業の成功率とする.
- 2) 傾斜角度:把持が成功したとき(1点以上)のブロックのy軸と水平面の傾斜角度の平均値.
- 3) 位置偏差:把持が成功したときのx-y平面上のブロック重心位置とハンド中心位置の距離の平均値.

- 4) 作業時間：把持が成功したときに要した時間の平均。

上記の項目を被験者ごとに出すとともに、被験者全員の平均値を出し、本把持システムの評価とする。

4.3 実験結果

把持作業実験の成功率、傾斜角度、位置偏差、作業時間の全被験者の平均値を図-13に示す(個々の被験者の実験結果は付録に示す)。物体の把持例を図-14に示す。また、被験者によるものではないが参考例として、触像体の作成されていく様子を図-15に示す。

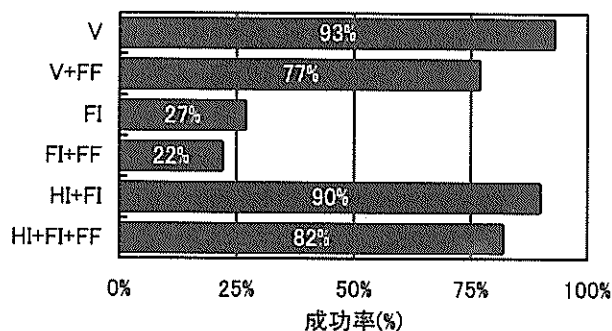
図-13から、成功率は、視覚が伴う実験1, 2では非常に高い値となっている。実験3, 4の把持対象物が見えない条件で反力の視覚化や反力提示だけでは、非常に低い成功率である。不可視の場合でも実験5, 6の触像体を用いると成功率が高く、可視の場合と比較しても遜色はないといえる。触像体に関しては全員の被験者が100%作成することができた。いずれの実験でも、力帰還を行うと、可視、不可視の条件でともに成功率が悪くなっている。この原因としては、まず、力覚が帰還されることにより、操作者の

手が動かされることと考えられる。また、画面では小さな物体であるが、質量は非常に大きいため、慣性力による揺れの周期も大きく、視覚と力覚の不整合により、操作者の感覚を惑わすことになっていると考えられる。実験3, 4において、成功率は低い値となったが、反力の視覚化を行わなければ把持作業はまったく行えない。反力の視覚化は有効な情報提示手法であるといえる。

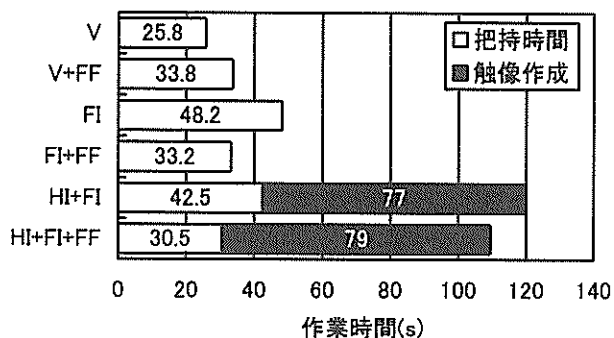
傾斜角度は力覚が加わると、傾斜量が大きくなっているこれも、操作者が操作装置の発生する力に影響されているためと考えられる。

重心偏差は触像体を使用した場合にはほとんど誤差なく重心とハンドの中心位置が合っている。これは、可視の場合より、より慎重に把持位置の調整を行ったためと考えられる。他の条件でも、数十センチの誤差しかないため、実際には十分であるといえる。

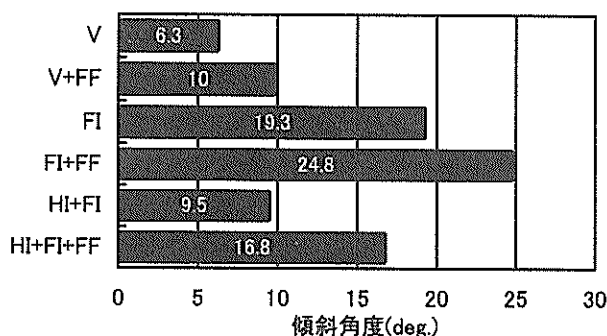
作業時間は触像体を作る場合、可視のときの倍以上かかっている。触像体を作成する時間が多くを占め、触像体を構成してから作業完了まではそれほどの時間はかかっている。



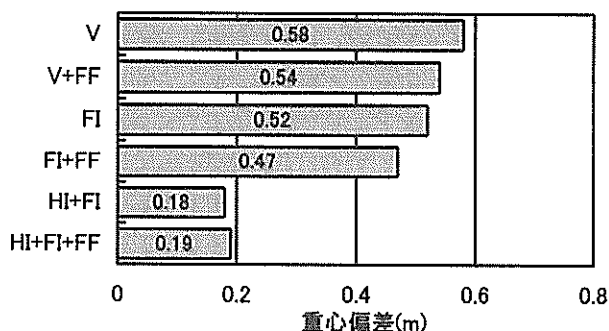
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

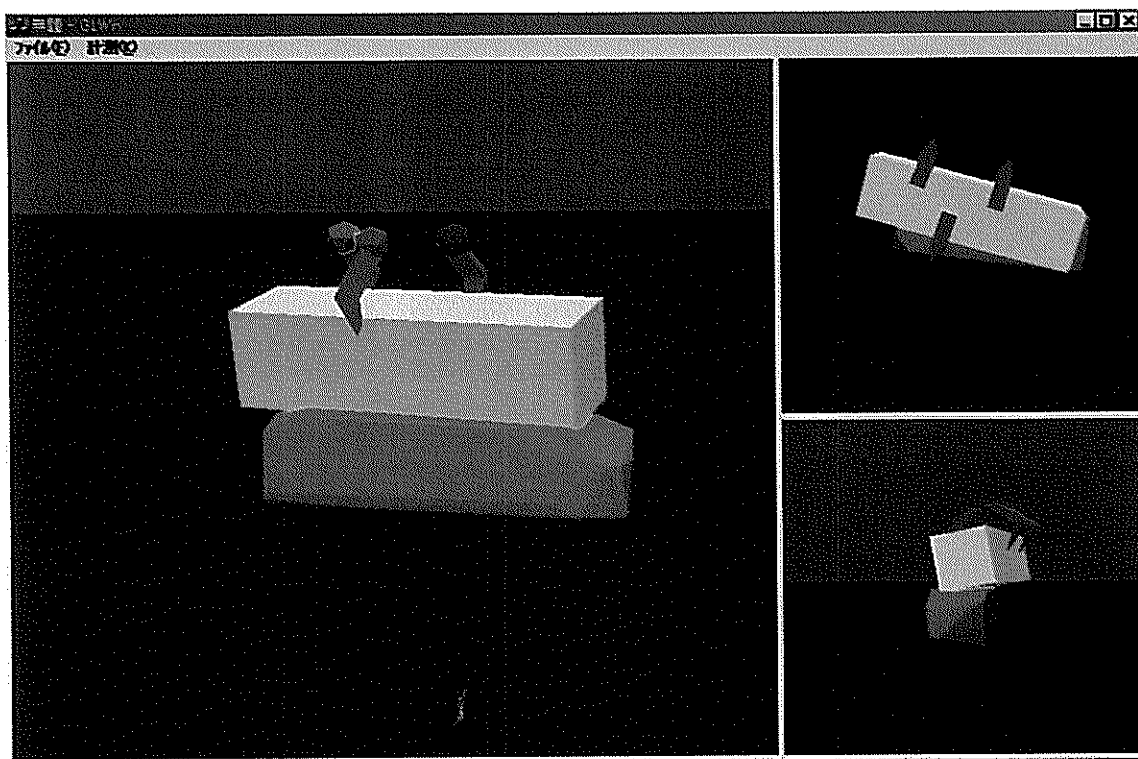


(3) 傾斜角度

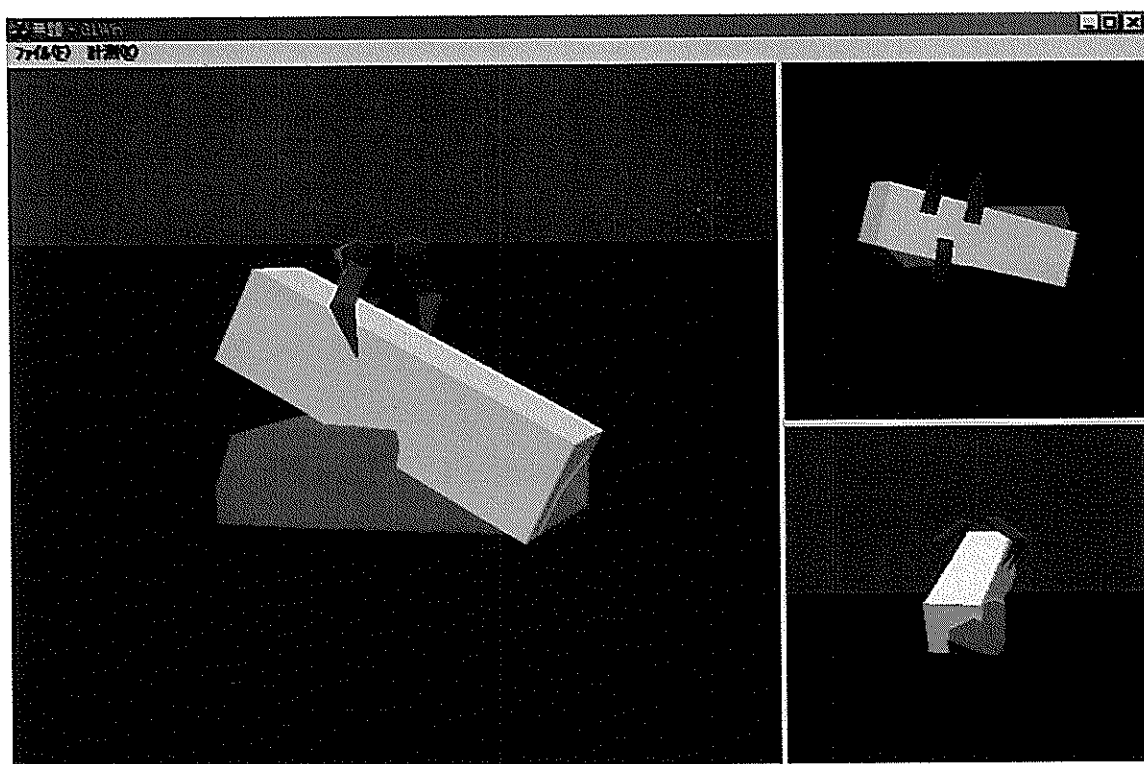


(4) 重心位置偏差

図-13 被験者全員の平均値



(a) 把持成功 (点数 2 のとき)



(b) 不完全持ち上げ (点数 1 のとき)

図-14 把持作業実験の様子

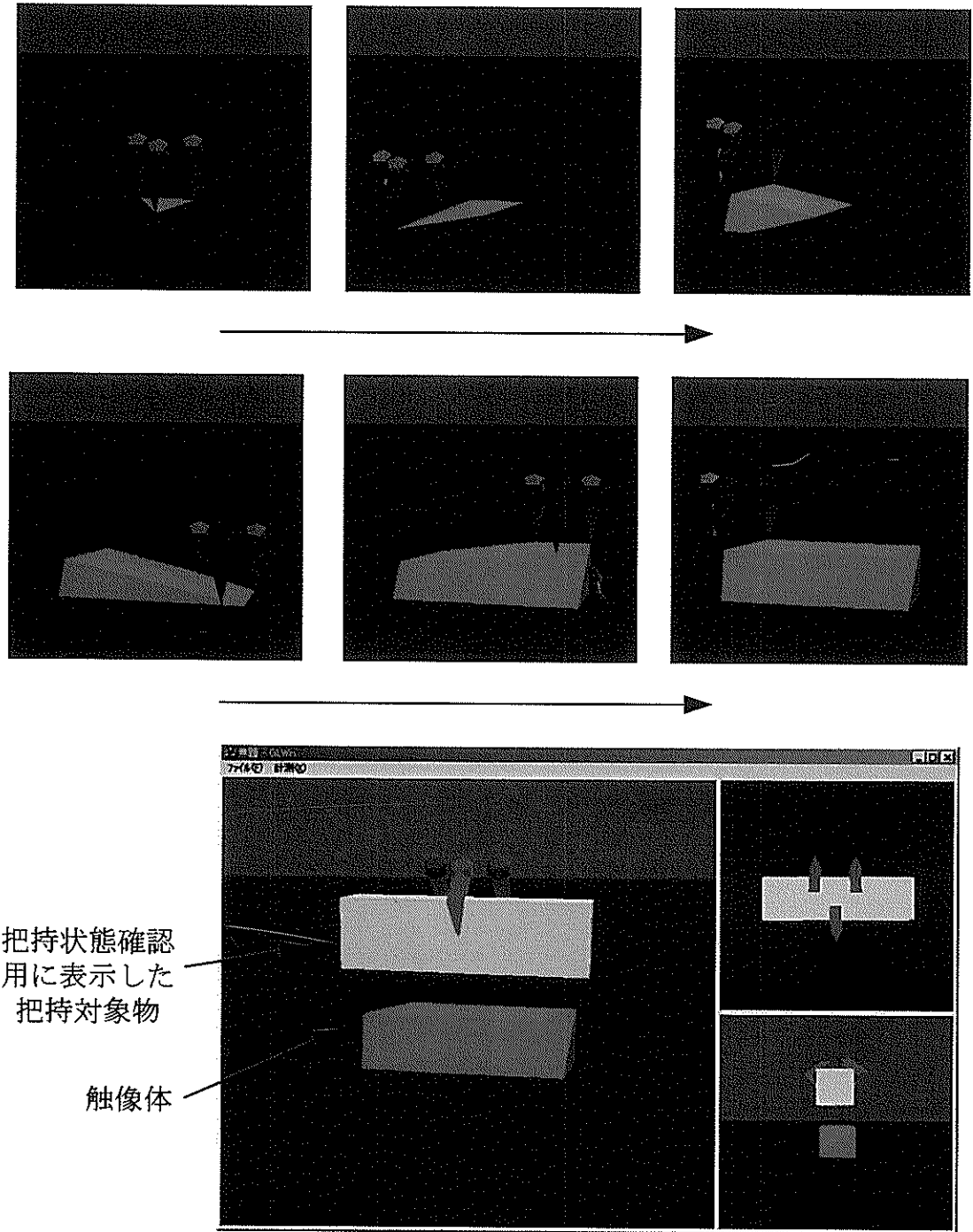


図-15 触像の視覚化例

実験 3, 4 は傾斜角度や位置偏差, 作業時間ともに好成績である。この結果は少ない成功の中から得られた値であり, 作業の早い段階で, 運良く物体を見つけ把持できたことによると考えられる。

図-14(a)から, 触像体を作りうまく把持を行っている様子がわかる。重心位置はわずかにずれているため, 重力方

向反力提示部の色にばらつきが出ているが, 把持の安定は保たれている。また図-14(b)から, 触像体は構成できたものの, 持ち上げに失敗してしまった様子がわかる。図-15から見えない把持対象物に触れるたびに触像体の形状が, 更新され把持対象物に近づいていく様子がわかる。

実験 5, 6 において触像体の構成作業はどの被験者も

100%できたが、把持して持ち上げるときに失敗をしている。このことから、手探りで把持対象物を探る作業では、ハンドの指先と被験者の指先位置が対応する位置対応型のマスタ・スレーブ制御が、直感的に操作可能な点で有効であると言える。対象物が確定した段階からは、ぶれなどが出やすい位置指令・力帰還マスタ・スレーブ制御よりもキーやレバー操作による制御のほうが有効であると考えられる。本シミュレーションプログラム自体は、キーボードによりハンドを操作することが可能であるが、操作は簡単ではなく、操作者のなれが必要である。したがって、専用のレバーなどによる装置が必要となるが、複数の操作装置が混在するのは望ましくない。そこで操作装置を位置指令と速度指令を切り替えられるようにすることで、把持作業の確実性を高めることができると考えられる。

実験中、あるいは実験後に被験者からは疲労を訴える声が多く聞かれた。操作装置が専用でないこともその一因であるが、作業中、操作者の手は、空中において不自然な姿勢で位置決めを行わねばならず、不要な力が多く働くためと考えられる。

シミュレーション画面は3D描画ではあるが普通のモニタであるため、距離感や前後位置は理解しにくい。異なる視点の補助画面を利用して、前後位置などを補正することは有効であった。実験は一人につき全部で1時間程度かかっているが、画面に対して、目の疲労感などは聞かれなかった。

5. あとがき

被験者による把持作業シミュレーション実験により、以下のことが明らかとなった。

- 1) 触像の視覚化が難視覚時の遠隔操作に有効であることがわかった。
- 2) 触像体により、被験者によらず、難視界時にも物体の認識ができる
- 3) 物体を持ち上げるときは、力覚フィードバックは操作者を惑わす結果となった。
- 4) 位置指令と速度指令を切り替えられる操作装置が必要である。
- 5) 単純な位置操作型操作装置では疲労がある。
- 6) 複数視点の提示は有効である。

AR 手法を視覚の乏しい水中の遠隔操作把持システムに用いることが、非常に有効であることが本研究により明らかになった。今後は、

- 1) 把持装置模型による把持作業実験。
 - 2) より複雑な形状に対応する触像体作成方法の開発
 - 3) 反力伝達方法の改善。
 - 4) 疲労の少ない操作装置とその制御方法の開発。
 - 5) 高負荷に対応した力センサの開発。
 - 6) 油圧駆動型の把持装置試作機的设计・製作
 - 7) グラブ型把持装置への応用
- 等を行っていく予定である。

(2001年11月15日受付)

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた前施工・制御技術部長 野村 剛様、実験にご協力を頂いた施工・制御技術部の皆様、非常勤、パート職員の皆様、また、論文の作成にあたり、貴重なご指導を頂いた加藤一正幹事に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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，pp44-49。
- 2) 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，pp55-58。
- 3) 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，pp3364 - 3671。
- 4) 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，pp752-757。
- 5) 吉江宗生，白井一洋，田中敏成，平林丈嗣：港湾工事へのロボット技術の導入，第8回建設ロボットシンポジウム論文集，2000，pp.29-36。
- 6) 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。
- 7) 平林丈嗣，内海真，吉江宗生他：水中施工ロボットにおける Augmented Reality を用いたマンマシンインターフェース，テクノ・オーシャン 2000 論文集，2000，pp.411 - 416。
- 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，1 B18，2001，pp.25-26。

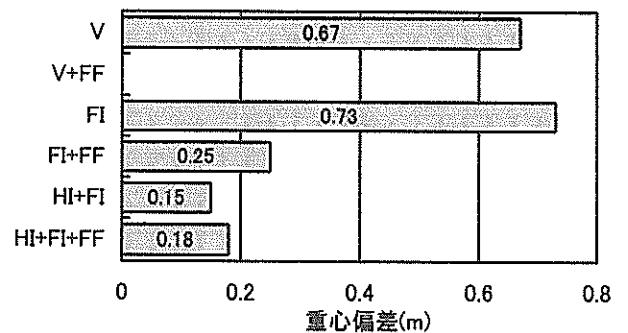
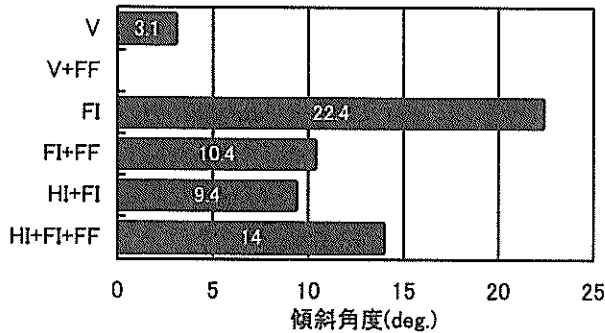
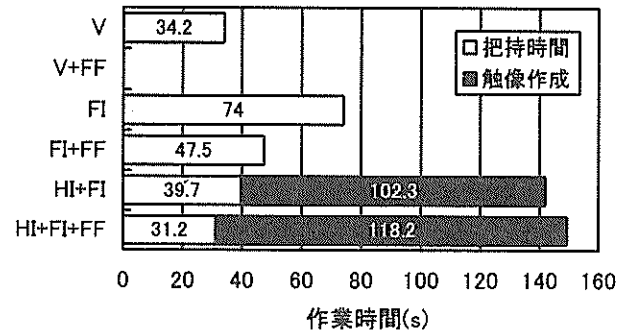
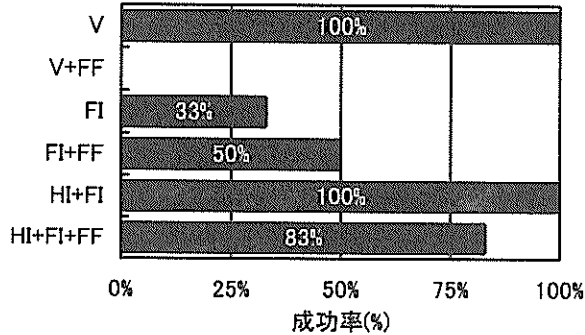
付録 各被験者の把持作業実験結果

付表-1 に示す実験条件において 10 人の被験者 (27 歳から 49 歳までの男女) により, 把持シミュレーション実験を行った. この実験の各被験者の実験結果を付図-1 に示す.

付表-1 実験条件 (再掲)

実験	把持対象物	情報提示手法
1	可視	V
2	可視	V+FF
3	不可視	FI
4	不可視	FI+FF
5	不可視	HI+FI
6	不可視	HI+FI+FF

V : (Vision) 視覚,
 FF (Force Feedback) : 反力の伝達,
 FI (Force Indicate) : 反力の視覚化,
 HI (Haptic Image object) : 触像の視覚化



(1) 成功率

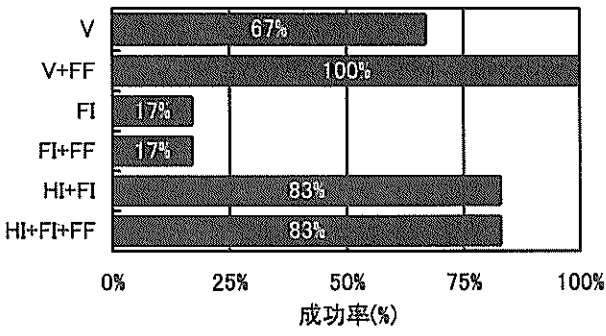
(2) 斜角度

(3) 位置偏差

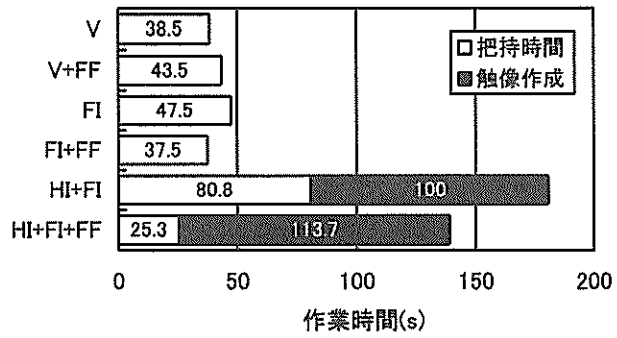
(4) 作業時間

付図-1(a) 被験者 1 の実験結果

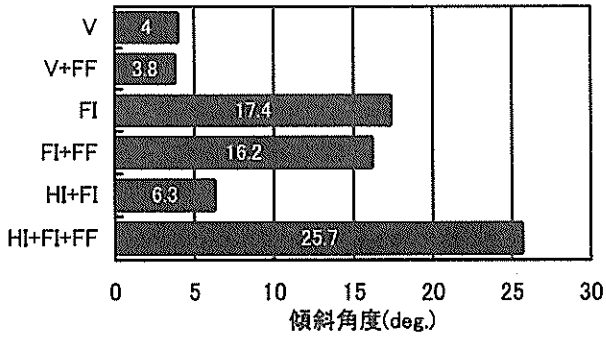
難視界時の把持作業における拡張現実感 (AR) を用いた視覚補完手法



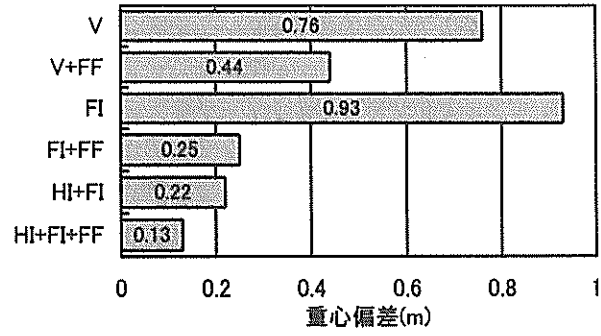
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

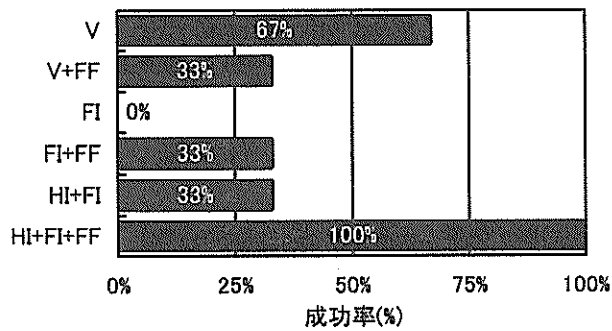


(3) 傾斜角度

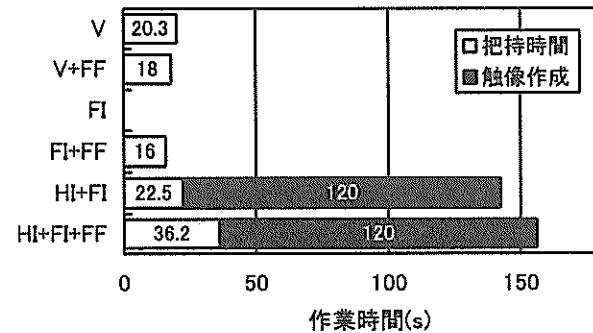


(4) 重心位置偏差

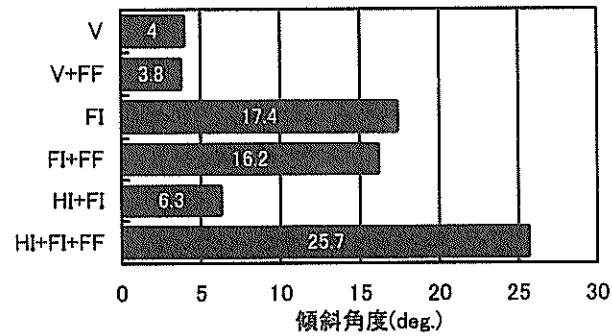
付図-1(b) 被験者 2 の実験結果



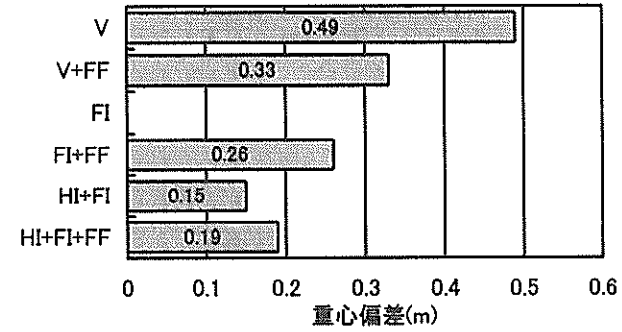
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

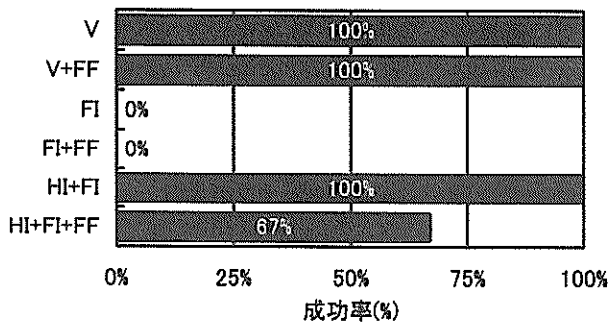


(3) 傾斜角度

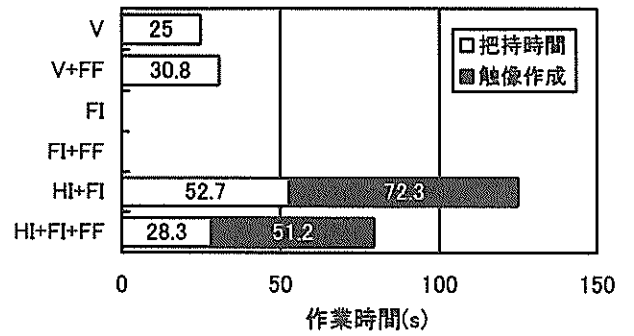


(4) 重心位置偏差

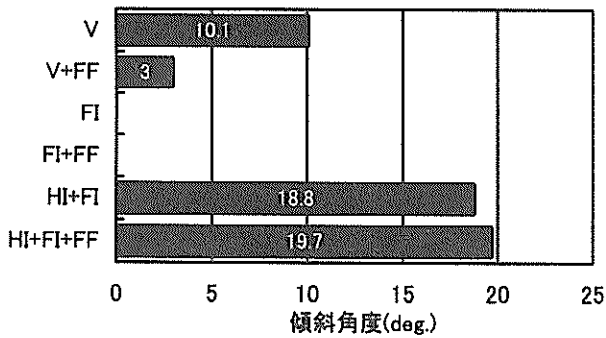
付図-1(c) 被験者 3 の実験結果



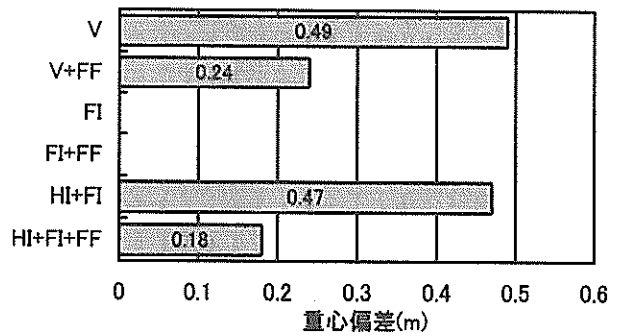
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

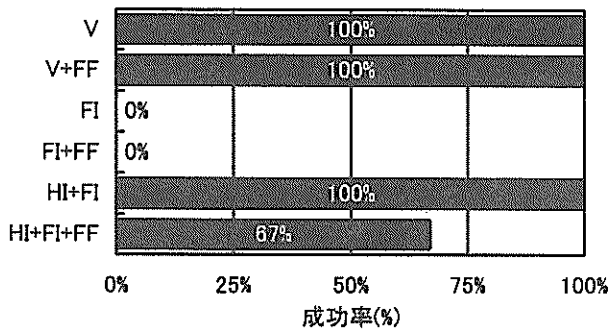


(3) 傾斜角度

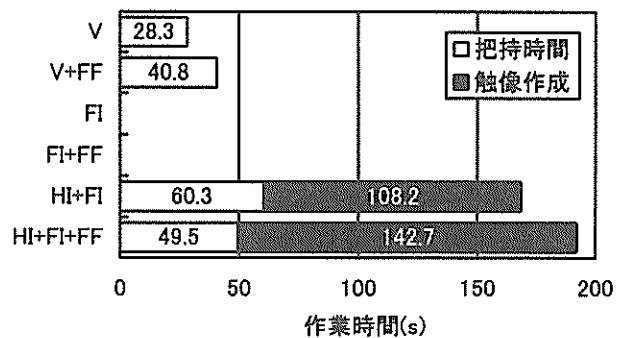


(4) 重心位置偏差

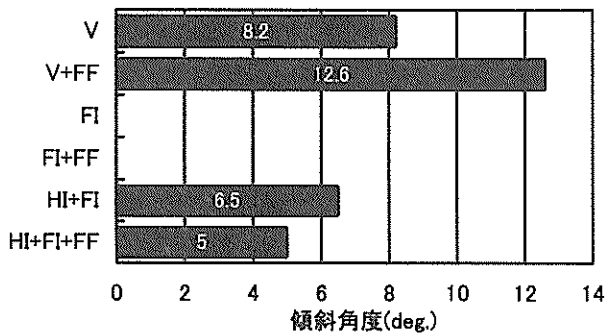
付図-1(d) 被験者 4 の実験結果



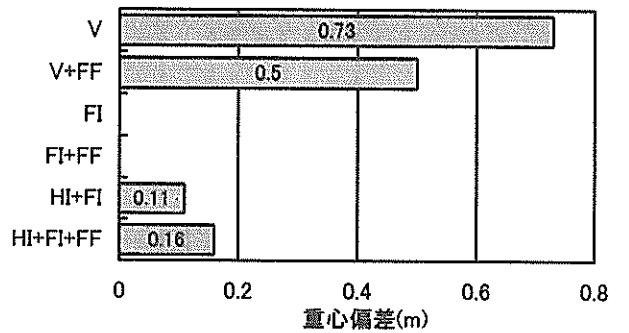
(1) 成功率



(2) 把持作業時間



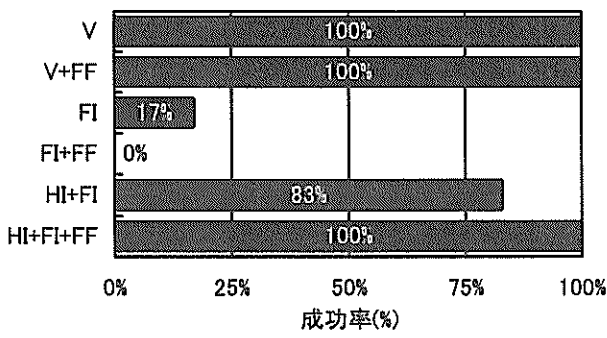
(3) 傾斜角度



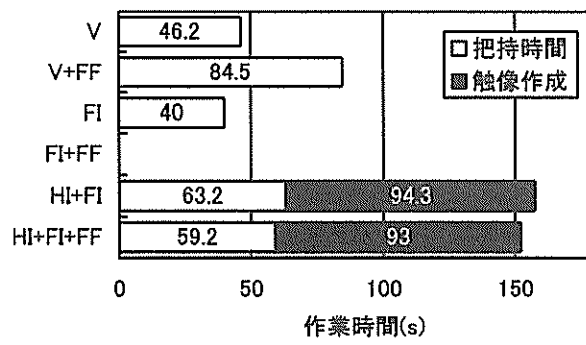
(4) 重心位置偏差

付図-1(e) 被験者 5 の実験結果

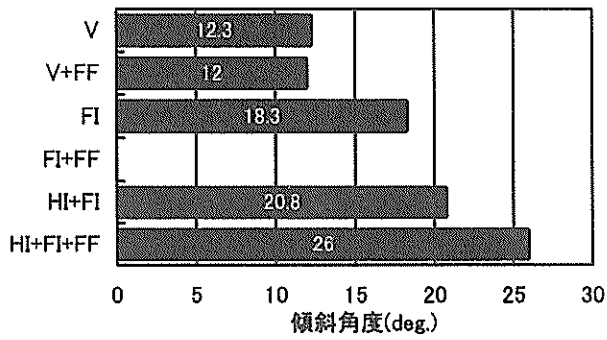
難視界時の把持作業における拡張現実感 (AR) を用いた視覚補完手法



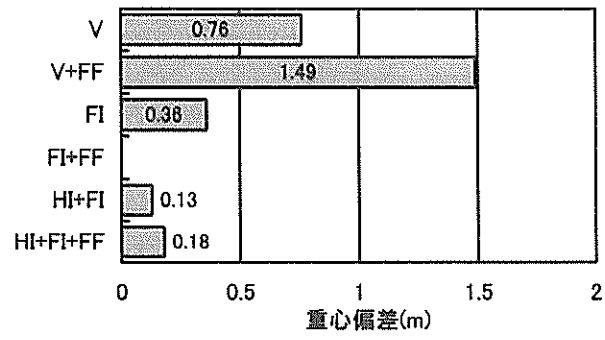
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

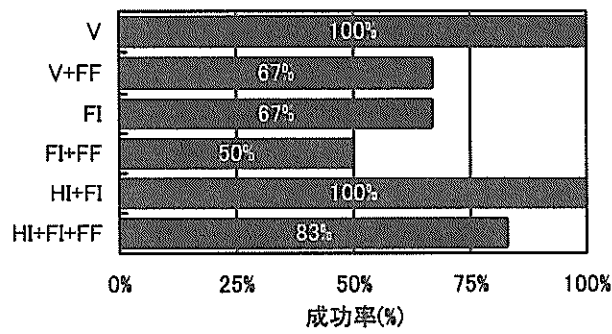


(3) 傾斜角度

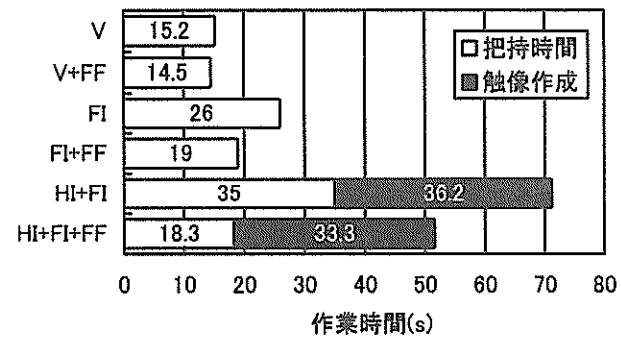


(4) 重心位置偏差

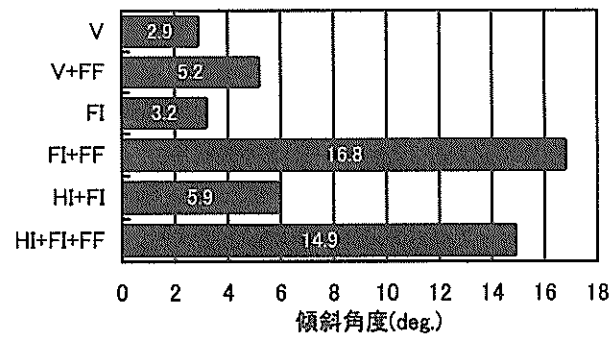
付図-1(f) 被験者 6 の実験結果



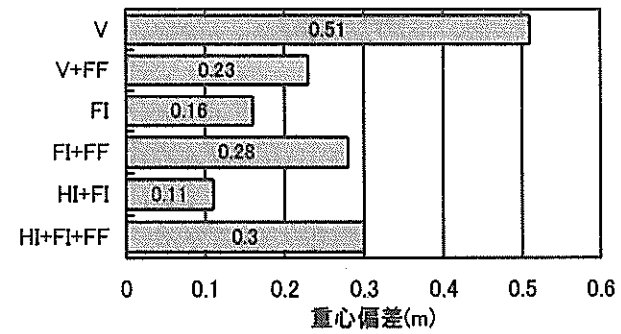
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

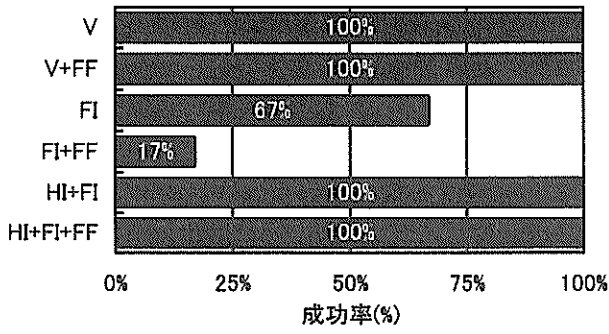


(3) 傾斜角度

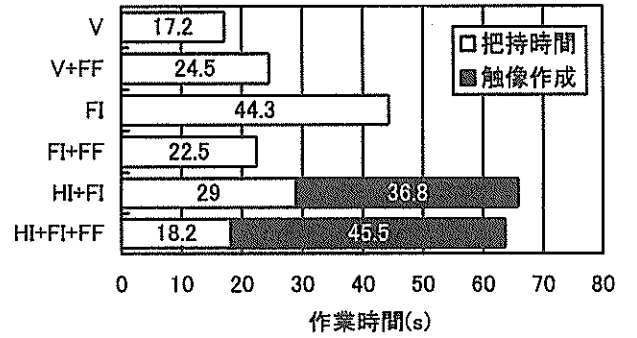


(4) 重心位置偏差

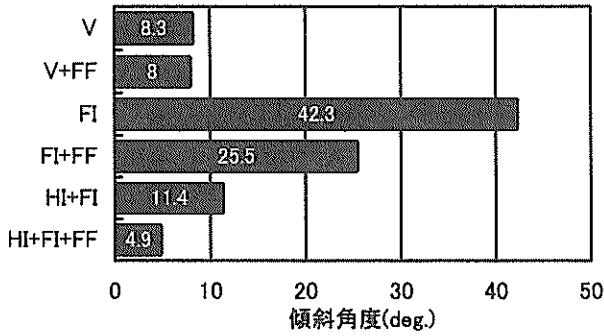
付図-1(g) 被験者 7 の実験結果



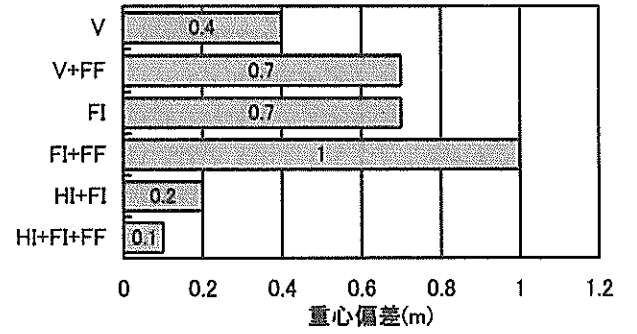
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

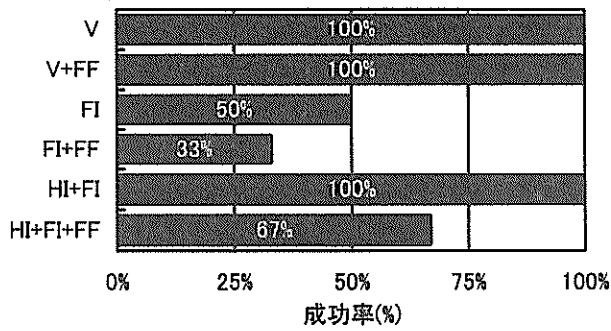


(3) 傾斜角度

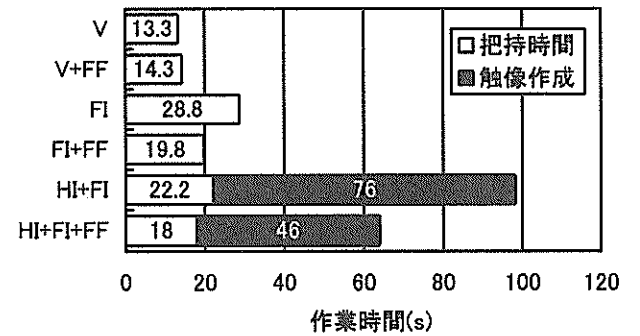


(4) 重心位置偏差

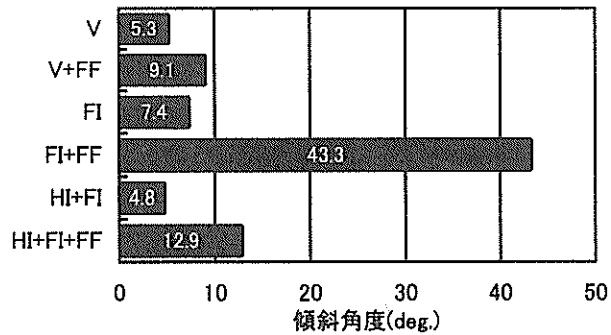
付図-1(h) 被験者 8 の実験結果



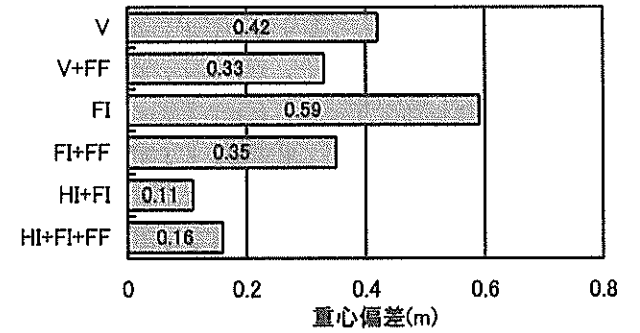
(1) 成功率



(2) 把持作業時間

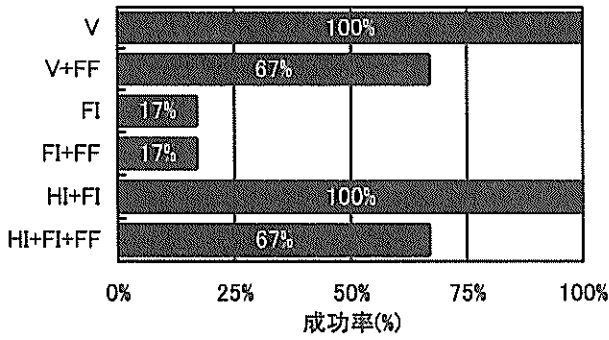


(3) 傾斜角度

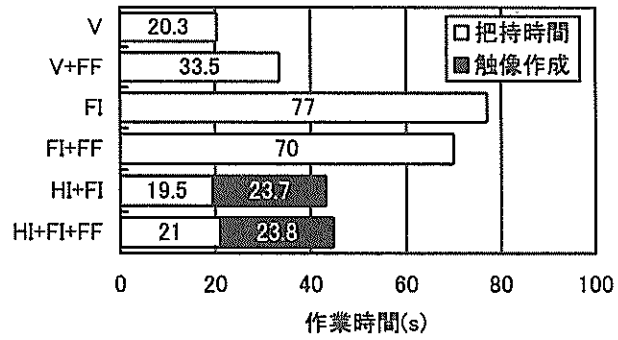


(4) 重心位置偏差

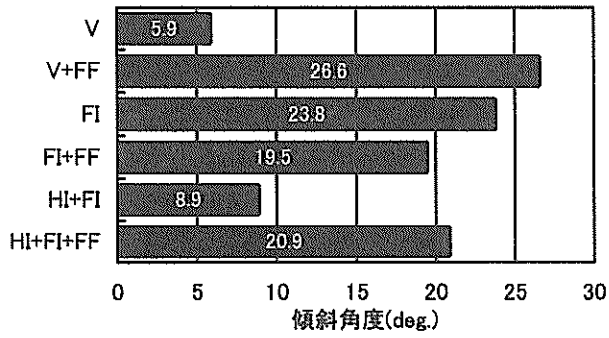
付図-1(i) 被験者 9 の実験結果



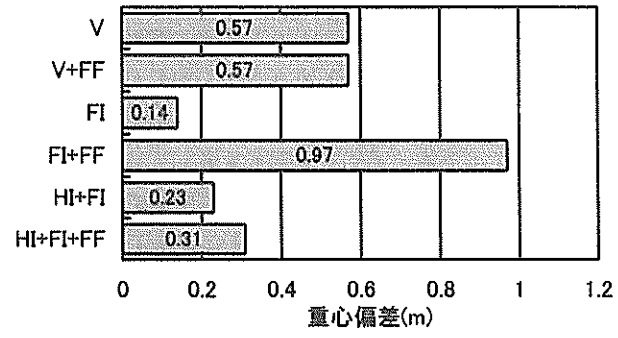
(1) 成功率



(2) 把持作業時間



(3) 傾斜角度



(4) 重心位置偏差

付図-1(j) 被験者 10 の実験結果