

複数仮想物体の協調接合操作における一操作補助手法

清川 清[†], 正会員 竹村 治雄[†],
岩佐 英彦[†], 正会員 横矢 直和[†]

Manipulation Aid for Assembling Multiple Virtual Objects

Kiyoshi Kiyokawa[†], Haruo Takemura[†], Hidehiko Iwasa[†],
and Naokazu Yokoya[†]

Abstract This paper describes a case study on software aid for assembling multiple virtual objects. We first propose two manipulation supporting methods: “discrete placement constraints” and “collision avoidance” and then evaluate the effectiveness of these methods in cooperative virtual objects assembly. We next investigate the combination of these methods through an empirical study for obtaining an optimal combination. Experimental results show that our method is efficient in both decreasing the time required for object assembly and improving the sensation of actually manipulating the objects.

1. ま え が き

近年の人工現実感アプリケーションでは、両手操作、あるいはネットワークを介した複数操作者の共同作業を可能とするものが増えており^{1)~4)}、このような複数の仮想物体が同時に操作される環境において、仮想物体の操作性を向上する重要性は高まっている。本論文では、複数仮想物体の協調操作を取上げ、これを支援するための操作補助手法について検討する。

一般に、仮想環境内で意志通りに効率良く仮想物体を操作するためには、行おうとする操作が容易になるように、適切な操作補助を提供することが有効である。従来、このような操作補助として、仮想物体同士の距離や干渉状態に基づいて、仮想物体の操作自由度を視覚的に拘束する手法が提案されている⁵⁾⁶⁾。操作自由度を視覚的に拘束するこのような手法は、複数仮想物

体の協調操作においても有効であると期待できる。

操作自由度を視覚的に拘束する際、拘束が弱すぎると手腕位置の物理的ぶれや測定誤差のために仮想物体の正確な配置が困難になる一方で、拘束が強すぎると自由な操作ができず意図通りの配置が困難になる。さらに、複数物体の協調操作の場合、自由度を拘束する基準となる参照座標系を物体の位置に応じて移動する必要があるが、拘束される物体が操作者の意図に反して移動し、単一物体を操作する場合に比べ操作が困難になる恐れがある。したがって、できるだけ自由な操作を許しつつ、正確な配置を可能とする操作自由度の適切な拘束手法が要求される。さらに、多数の仮想物体が存在し、複数の仮想物体が同時に操作される場面に適用する操作補助手法としては、アルゴリズムは高速な処理が行える簡易なものであることが望ましい。

本論文では、こうした要求を満たす操作補助手法に

キーワード：人工現実感，操作補助，干渉検出，自由度の拘束

1996年11月28日，テレビジョン学会・SID日本支部主催 The 3rd International Display Workshops に発表。

1996年12月27日受付，1997年3月3日再受付

† 奈良先端科学技術大学院大学 (〒630-01 生駒市高山町 8916-5, TEL 0743-72-5298)

† Nara Institute of Science and Technology (8916-5 Takayama, Ikoma, Nara 630-01, Japan)

ついて検討する。まず2章では、複数の操作物体同士の配置作業を補助するために必要な機能を検討し、仮想物体の簡易な操作補助手法として「離散配置制約」と「干渉回避」を提案する。次に3, 4章で、複数仮想物体の協調接合操作に対して実施した2つの被験者実験について述べる。3章では、2つの提案手法を用いる場合と用いない場合で作業効率を比較し、提案手法の有効性を確認する。4章では、3章の実験より得られた知見に基づいて、離散配置制約を有効にする基準について検討し、2種類の操作補助の最適な組合せについて検討する。実験結果より、2方式を適切に組合せた操作補助手法が作業効率や主観的操作感覚の向上に顕著な効果のあることが示された。最後に、従来手法との比較を交えて、提案手法の一般的な仮想環境における有効性について考察する。

2. 操作物体同士の配置に必要な操作補助

本章では、仮想物体を複数同時に操作しこれら同士を正確に配置する場合にどのような操作補助が有効であるかを検討し、2つの操作補助手法を提案する。図1に、操作補助手法に関する問題を検討するために構築した仮想物体操作環境の構成を示す。本環境では、操作者1名の両手による仮想物体操作または操作者2名の片手による仮想物体操作が可能である。

仮想物体間の相対位置や相対姿勢を拘束して正確に揃えようとする場合、少なくとも1つ以上の仮想物体の位置や姿勢を変更する必要がある。この際、仮想物体を拘束する参照座標系の設定方針および参照座標系への拘束方針が問題となる。まず、参照座標系の設け方としては、全操作物体の位置や姿勢から動的に決定する方法と、特定の操作物体の位置や姿勢に基づき静的に決定する方法が考えられる。ここでは、同時に操作される物体数が変動する場合にも参照座標系が安定する後者の方法を採用する。ただし、この場合参照座標系を特定する操作物体(参照物体)をどう決定する

かが問題となる。ここでは、人間が両手を用いて実物体を配置するとき、先に土台となる物体を把持し後に土台に置く物体を把持する機会が多いという観察に基づき⁷⁾、時間的に最も早く把持された仮想物体を参照物体とする。

次に参照座標系への拘束方針について検討する。参照物体や他の物体(従属物体)は通常多面体で表現され、正確な配置が要求される対象は仮想物体間の面同士の相対位置や相対角度である。また、仮想物体は一般に複雑な形状を持つが、実用上配置可能な相対位置や相対的姿勢を限定できることが多い。したがって、従属物体の位置や姿勢を、参照座標系に対して配置可能なもののうち最尤の値に変更する手法が有効であると期待できる。そこで、配置可能な位置や姿勢の設定方針が問題となる。ここでは、仮想物体の幾何形状によらずに有用と思われる以下の方針を採用する。

- ・従属物体の姿勢を参照座標系の軸に平行に揃える。
- ・従属物体の位置を参照座標系の格子点に揃える。

さらに、この方針に基づき次のような操作補助手法、「離散配置制約」を提案する。

2.1 離散配置制約

「離散配置制約」は、把持した従属物体の取り得る位置と姿勢を参照座標系に対して離散的に制限し、仮想物体同士の位置合せを容易にする。位置の離散配置制約では、操作者が触覚などに頼らずに空中で位置を指示できる精度は1cmから2cm程度であるという報告に基づき⁵⁾、参照座標系に1cm間隔で格子点を設け、従属物体を最近傍の格子点に並行移動する。姿勢の離散配置制約では、仮想物体間で辺や面の向きを揃えやすくするため、参照座標系に対する従属物体の姿勢を4通りのみに制限する。具体的には、参照座標系の x, y, z 軸正の向きをそれぞれ $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$ と表記すると、図2に示すように、(a)従属物体を外積 $y_{obj} \times y_{ref}$ 回りに回転し y_{obj} を y_{ref} の向きに揃え、(b) $\pm x_{ref}, \pm z_{ref}$ の4方向中で x_{obj} との内積 $x_{obj} \cdot (\pm x_{ref}), x_{obj} \cdot (\pm z_{ref})$ が最大のものに対し、これに x_{obj} の向きを揃えるよう従属物体を y_{ref} 軸回りに回転する。

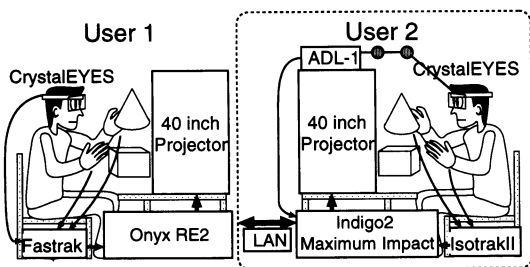


図1 実験環境のハードウェア構成
Hardware configuration.

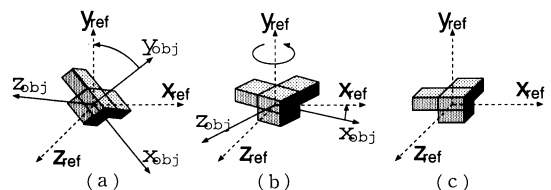


図2 姿勢の離散配置制約
Discrete orientation constraints.

離散配置制約の結果、仮想物体のバウンディングボックスの境界面は参照座標系の軸と平行であるか直交する。このことを利用して、高速かつ簡易な干渉検出を用いた操作補助手法「干渉回避」を提案する。

2.2 干渉回避

「干渉回避」は、バウンディングボックスの範囲を比較する簡易な干渉検出を行い、干渉がある場合には従属物体の位置を補正する。これにより仮想物体同士がすり抜けるのを見かけ上防ぎ、正確な配置を支援する。この干渉検出は、計算上、離散配置制約で従属物体を参照座標系に揃えた後、仮想物体を構成する部分形状のバウンディングボックスの範囲を再帰的に比較して行われる。そのため、仮想物体間の頂点間距離をすべて比較する厳密な方法に比べ計算量が小さく高速である。従属物体は、干渉が起きるまではそれぞれの3次元カーソルに追従し、干渉が起きると干渉した仮想物体と接触する位置に移動される。

3. 操作補助手法の有効性を検証する評価実験 (実験1)

本章では、前章で提案した2種類の操作補助手法、干渉回避と離散配置制約が協調接合操作に与える効果を評価実験を通して検証する。具体的には、試作した実験環境で各操作補助の有無の計4通りで協調接合操作を行い、時間効率や誤り率を比較する。協調接合操作は操作者1人の両手操作と、操作者2人の共同操作の双方を行った。

3.1 実験タスク

図3に実験の設定を示す。実験用仮想空間には仮想物体 O_A, O_B 、さらに3次元カーソル A, B が存在する。 O_A と O_B は直方体となるように接合できる。 O_A と O_B の各タスクの初期位置は固定であり、初期姿勢は O_A, O_B それぞれについて垂直軸回りで回転角の異なる4通り、両物体で計16通りがタスク毎に循環する。

被験者は単独または2人で協力して仮想物体を操作し直方体となるように接合する。このタスクは以下に示すサブタスクからなる複合タスクである。

- (1) 2つの3次元入力装置を操作して3次元カーソル A, B を仮想物体 O_A, O_B に移動する。
- (2) 3次元入力装置の保持ボタンを押下して仮想物体を把持する。
- (3) 把持した2つの仮想物体を互いに近づける。
- (4) 接合可能な位置で一方の保持ボタンを解放し、2つの仮想物体を接合する。この時、接合物体が直方体とならなくても修正は許さない。

各被験者は、このタスクを表1に示す操作補助の4種の組合せの下で行う。また、実験中に以下の指標を記録する。

【タスク達成時間】仮想物体が初めて把持されてから接合物体が解放されるまでの時間。

【接触時間】1タスクの実行中に2つの仮想物体が互いに接触していた総時間。

【誤り率】接合物体が直方体とならなかったタスク数の総タスク数に対する比。

3.2 実験結果

全10名の被験者について、両手操作8名、共同操作4組(8名、うち6名は両手操作と重複)に対し実験を行った。被験者は全員仮想物体の操作に不慣れた本学男子学生である。各被験者が行った実験タスクは、操作補助の4種の組合せ毎に32回、計128回である。また、実験の順序による影響を軽減するため、両手操作、共同操作それぞれについて被験者群を2分し、一方の被験者群はNN, ND, CN, CDの順で実験を行い、他方はこの逆順で実験を行った。

図4に両手操作、共同操作それぞれについて、操作補助手法の組合せ4通りにおける被験者全員の平均タスク達成時間、平均接触時間、およびこれらの差である平均非接触時間を示す。また表2にこれらの数値、不等号で表した分散分析に基づく有意差、および平均誤り率を示す。さらに、習熟の様子を見るため、前半

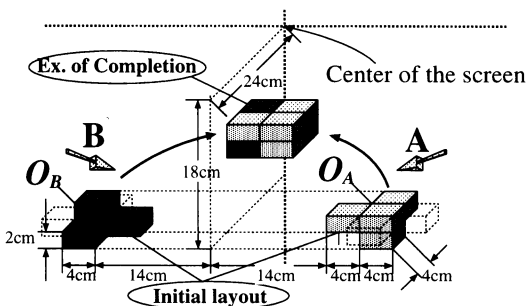


図3 実験の配置

Configuration of blocks in the experiments.

表1 実験1の操作補助の4条件
Four manipulation conditions in the experiment 1.

	collision avoidance	discrete placement constraints
CD	✓	✓
CN	✓	
ND		✓
NN		

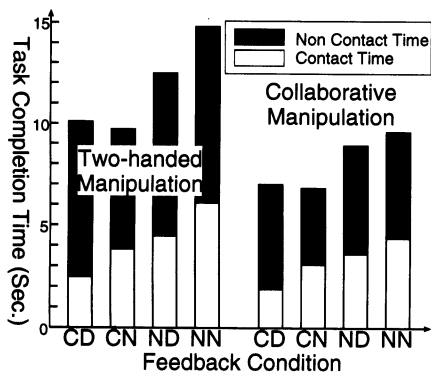


図4 平均タスク達成時間
Average task completion time.

16 タスク分の時間指標の平均値に対する後半 16 タスク分の時間指標の平均値の比を表中「学習効果」の欄に示す。これらの結果から以下のことが観察できる。

- (1) 両手操作、共同操作ともに、操作手法の 4 種の組合せ間で平均タスク達成時間は最短のものより CN, CD, ND, NN の順となった。CN の作業時間は NN に対し平均 66% である。また、分散分析の結果から、干渉回避がある場合にタスク達成時間が有意に短縮されることがわかり、干渉回避が協調接合操作の作業効率の向上に有効であることが確認できる。
- (2) 両手操作、共同操作ともに、操作手法の 4 種の組合せ間で平均接触時間は最短のものより CD, CN, ND, NN の順となった。また、分散分析の結果から、両手操作では干渉回避と離散配置制約がともに接触時間を有意に短縮し、協調操作でも干渉回避が有意に接触時間を短縮していることがわかる。この結果、操作補助の組合せが CD の場合の接触時間が、他の場合に比べて有意に短縮されており、接触時には 2 種

類の操作補助をともに提供する手法が優れることが確認できる。実験遂行の様子を観察したところ、被験者は仮想物体の姿勢合せを主に非接触時に行い、接触時には主に位置合せを行うことがわかった。すなわち、干渉回避と離散配置制約がともに位置合せを容易にしていることがわかる。干渉回避が位置合せに有効である理由は、これにより仮想物体の相対位置を維持しやすくなるためと考えられる。一方、離散配置制約が位置合せに有効である理由は、これにより仮想物体の相対位置を確認しやすくなるためと考えられる。

- (3) 両手操作、共同操作ともに、平均非接触時間は操作補助の組合せが CN の場合において顕著に短い。また、分散分析の結果から、CN の場合の非接触時間が他の場合に比べて有意に短縮されていることが確認できる。それぞれの操作補助手法の有無について比べると、有意差は見られないものの、干渉回避は非接触時間を短縮し、離散配置制約は非接触時間を増加していることがわかる。まず、干渉回避がある場合、平均非接触時間が 19% 短縮し、分散値も減少している。これは、干渉回避がある場合、仮想物体同士がすり抜けないことを利用して、被験者がこれらを素早く安定に接近できたためと考えられる。一方、離散配置制約がある場合、平均非接触時間が 12% 増加し、分散値も増加している。これは、離散配置制約がある場合、参照物体の回転によって従属物体の姿勢が強制的に変更されるために、姿勢合せが困難になるためと考えられる。
- (4) 干渉回避と離散配置制約は、それぞれの導入によって誤り率が減少している。この傾向は離

表2 実験1における指標の平均値と分散分析結果 (有意水準 $\alpha = 0.05$) .
Average and analysis of variance of performance in Experiment 1.

指標 \ 条件	両手操作				共同操作			
	CD	CN	ND	NN	CD	CN	ND	NN
タスク達成時間	10.1 (秒)	9.4	12.5	14.8	7.0	6.8	8.9	9.6
分散	83.6	23.2	204.8	138.5	36.0	6.9	129.3	40.9
学習効果	0.91	1.04	0.81	1.04	1.08	0.89	1.12	0.89
接触時間	2.5	3.7	4.5	6.1	1.9	3.1	3.6	4.4
分散	9.3	6.7	28.5	28.7	3.2	3.0	15.8	10.3
学習効果	0.80	0.92	0.97	1.22	1.08	0.87	1.04	0.89
非接触時間	7.6	5.7	8.0	8.7	5.1	3.7	5.3	5.2
分散	48.7	11.4	112.8	60.6	23.1	2.3	66.1	17.2
学習効果	0.95	1.12	0.73	0.93	1.07	0.90	1.18	0.89
誤り率	0.05	0.08	0.12	0.16	0.05	0.07	0.13	0.12

散配置制約よりも干渉回避の方が顕著である。

(5) 学習効果について、各条件の前半 16 タスクと後半 16 タスクの時間指標の間に有意差は認められなかった。定性的には、習熟とともに時間指標が短縮するか否かは離散配置制約の有無に依存している傾向が認められ、この傾向は両手操作と共同操作によって正反対である。すなわち、両手操作では、離散配置制約のある場合に、習熟につれて時間指標が短縮する傾向があるのに対し、共同操作では、離散配置制約がない場合に、習熟につれて時間指標が短縮する傾向がある。両手操作では、離散配置制約がない場合は、2 つの仮想物体をともに自由に回転できるために、学習効果が早期に現れてそれ以降時間指標が短縮されず、離散配置制約がある場合は、徐々に制約の扱いに慣れていくために若干の学習効果が現れたものと考えられる。一方、意志の疎通が不自由な共同操作では、離散配置制約のない場合は、各操作者が自由に仮想物体を回転し共同で姿勢合せを行う操作に徐々に慣れていき学習効果が現れたのに対し、離散配置制約のある場合は、従属物体の姿勢制御が困難なため、共同で姿勢合せを行う操作に慣れることができなかつたものと考えられる。

(6) 2 種類の操作補助手法による作業効率の改善率は、両手操作と共同操作で同程度である。

この実験より、干渉回避と離散配置制約がともに接合操作の作業効率の向上に有効な操作補助手法であることが示されたが、仮想物体の接触の有無によって 2 つの操作補助手法の効果に差があることが明らかになった。すなわち、接合する 2 つの仮想物体が接触していない間は干渉回避のみを提供する手法が優れ、仮想物体が接触している間は干渉回避と離散配置制約をともに提供する手法が優れることが示された。接合する仮想物体の接触状態に合わせて、これらの手法を切替えることにより、作業効率をさらに改善することが期待できる。

4. 操作補助手法の最適な組合せを検討する評価実験 (実験 2)

前章の実験結果から、接触状態によって提供する操作補助を変更する手法が協調接合操作の作業効率をさらに改善する可能性があることが示された。本章ではこの示唆に基づき、干渉回避を常に有効にした上で離散配置制約を有効にする条件を変更し、協調接合操作を行う上でこれら 2 つの操作補助手法を用いる場

合の最適な組合せを評価実験を通して検討する。さらに、離散配置制約を有効にする条件として接合する仮想物体 O_A, O_B の各上面の法線ベクトルのなす角 $\theta (0 \leq \theta \leq 180)$ を基準とすることを考える。すなわち、非接触時は常に干渉回避のみ (CN) とした上で、

$$\text{接触時の操作補助} = \begin{cases} \text{CN} & (\theta > th) \\ \text{CD} & (\theta \leq th) \end{cases}$$

とし、閾値 th を様々に変更して作業効率や主観的操作感覚を評価する。 th が大きい場合、接触時に従属物体の回転角が急激に変更されることとなり、姿勢合せは容易になるが不自然な印象を与える可能性がある。一方、 th が小さい場合、離散配置制約を有効にするためには正確な姿勢合せを手動で行う必要があり、作業効率が低下する可能性がある。本実験の目的は、自然な操作感覚を与えかつ姿勢合せが容易となるような th を決定することである。

4.1 実験タスク

実験タスクは実験 1 と同じである。実験 1 の結果に基づき、干渉回避と離散配置制約が協調接合操作の作業効率に与える影響は、両手操作と共同操作で定性的に同程度であると判断し、本実験は両手操作のみで行った。各被験者は、 $th = 0, 3, 5, 10, 15, 20, 180$ (度) の 7 通りに加え、比較のために実験 1 の CD と同じく常に 2 つの操作補助を有効とする場合の計 8 通りの条件で実験を行った。なお、実験 1 の CN と同じく常に干渉回避のみを有効とする場合は $th = 0$ に相当する。実験後、各被験者に各条件の操作感覚を表 3 の 7 段階で同点を許して主観評価させる。また、指標として実験 1 と同じ、タスク達成時間、接触時間に加え、誤り率を次のように再定義して記録する。

[誤り率] 接合した瞬間に $\theta > th$ となっていたタスク数の総タスク数に対する比。なお、 $th = 0$ の場合は考慮しない。

4.2 実験結果

9 名の被験者に対し実験を行った。被験者は全員実験 1 の被験者であり実験タスクを熟知している。実験

表 3 7 段階主観評価の基準
Subjective evaluation.

7	非常に操作しやすい
6	かなり操作しやすい
5	やや操作しやすい
4	どちらでもない
3	やや操作しにくい
2	かなり操作しにくい
1	非常に操作しにくい

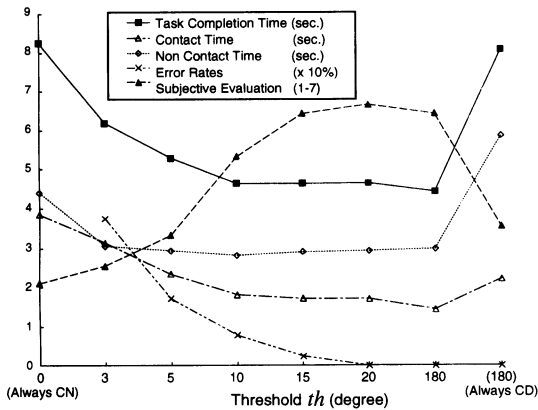


図5 実験2の結果
Results of the experiment 2.

は各条件を2段階に分けて行った。1段階目では、実験1で示唆された単純組合せ手法とCNおよびCDの3手法を特に比較するため、 $th = 0, th = 180$, CDの3条件でランダムな順序で実験を行った。次に2段階目では、 th の最適値を求めるため、残りの5条件で th の昇順および降順に実験を行った。各被験者が行った実験タスクは、各条件で32回、計256回である。図5に、各条件での平均タスク達成時間、平均接触時間、平均非接触時間、平均誤り率、平均主観評価値を示す。また、表4にこれらの数値と、不等号で表した分散分析に基づく各条件間の時間指標の有意差を示す。さらに実験1と同様に、習熟の様子を見るため、前半16タスク分の時間指標の平均値に対する後半16タスク分の時間指標の平均値の比を表中「学習効果」の欄に示す。これらの結果から以下のことが観察できる。

- (1) 図5のタスク達成時間を見ると、常に干渉回避のみ有効の場合(CN)や常に双方とも有効の場合(CD)に比べ、接触状態によって操作補助を切替える手法がすべての $0 < th \leq 180$

で優れることがわかる。さらに、表4から、 $10 \leq th \leq 180$ ではそれ以外の場合に比べ有意に時間指標が短いことが確認できる。

- (2) 接触状態によって操作補助を切替える場合、 $th \geq 15$ では、誤り率は約2%以下と小さく、時間的作業効率や操作感覚も最高レベルにある。一方、 $th \leq 10$ では誤り率や操作感覚が急激に悪化し、 $th \leq 5$ では時間的な作業効率も悪化する。これらのことから、作業効率や操作感覚を悪化させずに最も自由に仮想物体を操作できる th の値は15度程度であるといえる。
- (3) $th = 15$ の作業時間は $th = 0$ (CN)に対し、平均56%である。これに、実験1におけるCNの作業時間のNNに対する比66%を単純に掛けると37%となる。これより、操作補助のない場合に比べ、 $th = 15$ の場合、作業時間を60%程度短縮すると推定できる。
- (4) 学習効果について、各条件の前半16タスクと後半16タスクの時間指標の間に有意差は認められなかった。定性的には、 $th = 180$ とCDの場合の短縮率がやや大きく、さらに実験タスクに習熟する余地があったものと思われるが、概ね実験1で習熟は完了していたと見ることができる。

なお、CDの主観評価値は被験者によって1から7と極端な開きがあり、離散配置制約の制御のしやすさに個人差のあることが確認された。

5. 考 察

本論文の2つの実験を通して、仮想環境で直方体のような単純な物体を複数同時に操作し接合する場合、操作補助手法として提案した干渉回避と離散配置制約を適切に組合せることにより、作業時間の短縮や操作感覚の向上に効果のあることが示された。

表4 実験2における指標の平均値と分散分析結果(有意水準 $\alpha = 0.05$)
Average and analysis of variance of performance in Experiment 2.

指標 \ 条件	$th = 0$	$th = 3$	$th = 5$	$th = 10$	$th = 15$	$th = 20$	$th = 180$	CD
タスク達成時間	8.3 (秒)	> 6.2	> 5.3	= 4.6	= 4.6	= 4.7	= 4.4	< 8.1
分散	25.6	8.2	5.1	3.2	4.0	5.5	2.8	39.0
学習効果	0.97	1.03	1.04	0.96	1.00	0.97	0.93	0.92
接触時間	3.9	> 3.1	> 2.3	= 1.8	= 1.7	= 1.7	> 1.5	< 2.2
分散	7.6	4.4	2.7	1.2	1.0	1.5	0.6	4.5
学習効果	0.90	1.06	1.06	0.93	1.05	1.01	0.92	0.93
非接触時間	4.4	> 3.1	= 2.9	= 2.8	= 2.9	= 2.9	= 2.9	< 5.9
分散	14.2	2.0	1.7	1.7	2.3	2.3	1.7	22.3
学習効果	1.04	1.00	1.02	0.98	0.96	0.94	0.93	0.92
誤り率	—	0.38	0.17	0.08	0.02	0	0	0

仮想物体の操作補助を行う従来手法として、正確な干渉検出に基づく視覚的位置補正を行う方法⁶⁾や力覚提示を行う方法^{2),8)}がある。以下では、これらの手法と提案手法の比較検討を行う。これらの研究では、仮想物体の配置精度を評価することで、正確な操作を支援することを検証していることが多い。これに対し、提案手法は離散配置制約を導入し配置可能な位置を限定することで、1cm 以内の位置ずれや 15 度以内の姿勢ずれを吸収し、正確な配置を積極的に実現しているため、配置精度について従来手法と比較することはできない。作業時間の短縮に関しては、例えば文献 6) では仮想物体の頂点の許容配置精度を 3mm とした配置作業で、視覚的な位置補正により作業時間を 50% 以上短縮している。また、文献 2) では力覚の提示により、2 人の操作者間での仮想物体の受渡しに要する作業時間を 30~70% 程度短縮している。実験条件が異なるため定量的な比較は困難であるが、提案手法の作業時間短縮率 60% は従来手法と遜色がないと考える。本手法は、従来手法に比べ計算量が少なく高速な処理が期待できる上、特別な装置を必要としない点で有利である。また、仮想物体は一般に複雑な形状を持つが、実用上配置可能な面を特定できることが多く、配置可能な面の組合せに対し本手法を適用可能なアプリケーションは少なくないと考えられる。

なお、前章の実験 2) において、 $th = 10$ では、 $th \geq 15$ の場合と同程度の時間で位置合せが完了しているにも関わらず、接合のために仮想物体を解放した瞬間に角度のずれが生じる場合が多かった。これを踏まえ、本手法の改善案として離散配置制約を有効にする閾値 th_{in} を 10 度程度、一度有効になった離散配置制約を無効にする閾値 th_{out} を 15 度程度とするヒステリシスを導入する手法が考えられる。これらの値は一般的な直接操作環境で共通して使用できるのではないかと考えられる。

6. む す び

本論文では、仮想環境で両手操作や共同操作のように複数の物体を同時に操作する協調操作を考え、典型的協調操作である協調接合操作を行う際の操作補助手法について検討した。その結果、計算量の少ない簡易な干渉検出と離散的な位置姿勢の制約方針を最適に組合せることで、これらの補助手法のない場合に比べて協調接合操作実験の作業時間が 60% 程度短縮できることを示した。提案手法は正確な干渉検出を行う方法や力覚提示を行う方法に比べて単純であり、多数の仮想物体が存在する仮想環境で複数の仮想物体が同時に

操作される場合でも効果的な操作補助が可能である。

今後は離散配置制約を拡張し、より複雑な幾何形状に対しても違和感のない操作補助手法について検討する予定である。

〔参 考 文 献〕

- 1) Takemura, H. and Kishino, F.: "Cooperative Work Environment Using Virtual Workspace", Proc. Conf. on Computer-Supported Cooperative Work (CSCW '92), pp.226-232 (1992)
- 2) Ishii, M., Nakata, M. and Sato, M.: "Networked SPIDAR: A Networked Virtual Environment with Visual, Auditory, and Haptic Interactions", PRESENSE Teleoperators and Virtual Environments, 3, 4, pp.351-359 (1994)
- 3) Shaw, C. and Green, M.: "Two-Handed Polygonal Surface Design", Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '94), pp.205-212 (1994)
- 4) Mapes, D.P. and Moshell, J.M.: "A Two-Handed Interface for Object Manipulation in Virtual Environments", PRESENSE Teleoperators and Virtual Environments, 4, 4, pp.403-416 (1995)
- 5) 竹村, 北村, シャネゾン, 岸野: "仮想現実環境における物体配置タスクの一操作補助手法", テレビ誌, 48, 10, pp.1312-1317 (1994)
- 6) 北村, イー, 岸野: "面間の動的拘束を用いた仮想物体の操作補助法", 信学論(A), J79-A, 2, pp.506-517 (1996)
- 7) Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J.C. and Kassel, N.F.: "A Survey of Design Issues in Spatial Input", Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '94), pp.213-222 (1994)
- 8) 野間, 北村, 宮里, 岸野: "仮想物体操作における力覚と視覚のフィードバックの利用", 信学技報, MVE95-56, pp.9-18 (1996)



きよかわ きよし
清川 清 1994 年、大阪大学基礎工学部情報工学科中退。1996 年、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在同大学院大学博士後期課程在学中。人工現実感、3 次元モデリング、CSCW などの研究に従事。



たけむら はろお
竹村 治雄 1987 年、大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程単位取得退学。同年、(株) ATR 入社。ATR 通信システム研究所に勤務。3 次元ユーザインタフェース、CSCW、仮想現実などの研究に従事。1994 年、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。工学博士。正会員。



いわの ひでひこ
岩佐 英彦 1990 年、大阪大学工学部通信工学科卒業。1994 年、同大学院博士後期課程中途退学。同年、奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター助手。現在同情報科学研究科助手。人工知能、機械学習の研究に従事。



よこや なおかず
横矢 直和 1979 年、大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年、電子技術総合研究所入所。1986 年、マッギル大学客員教授 (1 年間)。1992 年、奈良先端科学技術大学院大学教授 (現在、情報科学研究科)。画像処理、コンピュータビジョン、CG の研究に従事。工学博士。正会員。