視点変更を用いた仮想空間 3 次元形状評価のための
協調作業支援システム*大久保 雅史^{*1}, 渡 辺 富 夫^{*2}, 久保 木 聡^{*3}Collaboration Support System for 3D Shape Evaluation in Virtual
Space Using Viewpoint ChangeMasashi OKUBO^{*4}, Tomio WATANABE and Satoshi KUBOKI^{*4} Department of Information Systems Design, Doshisha University,
1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

Collaboration mainly consists of two tasks; one is each partner's task that is performed by the individual, the other is communication with each other. Both of them are very important objectives for the collaboration support system. In this paper, a collaboration support system for 3D shape evaluation in virtual space is developed on the basis of studies in 3D shape evaluation and communication support in virtual space. The present system provides the two viewpoints for each task. One is the viewpoint of back side of user's own avatar for the smooth communication. The other is that of avatar's eye for 3D shape evaluation. Switching the viewpoints satisfies the task conditions for 3D shape evaluation and communication. In this paper, the some characteristics of the present system are described and the effectiveness of them is also demonstrated by the sensory evaluation and questionnaires analysis.

Key Words: 3D Shape Evaluation, Collaboration Support, Virtual Environment, Viewpoint Change, Sensory Evaluation

1. はじめに

近年の市場のグローバル化やインターネットをはじめとする通信技術の発展に伴い製品設計も複数の国や地域にまたがって行われることが多くなってきた⁽¹⁾。一方、計算機のコストパフォーマンスの向上、コンピュータグラフィックスやバーチャルリアリティ技術の進歩により大型のプロジェクトやヘッドマウントディスプレイ(HMD)に映し出された仮想空間の中で触覚ディスプレイや力覚センサ等を用いた各種入力デバイスによる直観的・直接的な設計の手法も開発されつつある⁽²⁾。このような背景から、遠隔地に居る複数の設計者が仮想空間を共有し、円滑にコミュニケーションをしながら製品形状の評価・決定ができるシステムの開発が切望されている(図1)。このような協調作業支援システムでは、作業支援とコミュニケーション支援の2つが重要となる⁽³⁾。そこで本論文では、我々がこれまでに行ってきた仮想空間における3次元形状評価システムの開発とその合成的解析および仮想空間を用いた遠隔コミュニケーションシステムの開発

とバーチャルコミュニケーションの解析・評価の研究成果を基にして、空間的に離れた複数のユーザが仮想空間を共有して、製品の形状評価を協調的に行うための支援システムを開発している。

Fig.1 Concept of 3D shape evaluation system for collaboration support.

2. 仮想空間における3次元形状評価

仮想空間での3次元形状評価における研究では、仮想空間での形状評価と実空間での形状評価との違いを明らかにし、仮想空間を用いた形状評価システムに反映させることを目的として、視覚、触覚、視線一行為連動系等の各種情報を制御可能なシステムを開発し、本システムを用いて仮想空間での3次元形状評価の合成的解析を行っている(図2)。ユーザは2つの対象形

* 原稿受付 2003 年 5 月 2 日.

^{*1} 正員, 同志社大学工学部(〒610-0321 京田辺市多々羅郡谷1-3).

^{*2} 正員, 岡山県立大学情報工学部(〒719-1197 総社市窪木111), 科学技術振興機構 CREST.

^{*3} 岡山県立大学大学院情報系工学研究科[現: (株)デンソークリエイト].

E-mail: mokubo@mail.doshisha.ac.jp

Fig.2 3D Shape evaluation system in virtual space.

状をHMD(オリンパス社製 Eye-Trek FMD-250W)で観察する。このときHMDに投影される映像はスキャンコンバータ(Micomsoft 社製 XVGA-1PRO)を通して送られてくるPC(Windows2000 professional SGI Zx10)上の仮想空間(SENCE8 社製 WorldToolKit)での3次元形状とユーザ自身の分身であるアバタの映像である。実空間でユーザが持つ入力デバイス(光造形品)とユーザの頭部、両手首、腰部に取り付けられた磁気センサ(Polhemus FASTRAK)の位置・角度情報をPCで処理し、仮想空間の3次元形状の操作および自己のアバタの動きに反映している。したがって、手に持った入力デバイスと頭部の相対位置と、デバイスの回転および自己の振舞いをそのまま仮想空間上に反映できる。また、視覚情報、触覚情報、視線・行為連動系の情報について個別に操作することができるため、ユーザがどのような感覚情報を基に、3次元形状を評価しているかを合成的に解析することが可能である。具体的には、本システムを用いて各種提示情報を操作した空間で、複数の被験者に対して、形状の好ましさを基準とした一対比較による官能検査を行い、形状の好ましさを数理モデルを立て、このモデルの整合性が保障されるかどうかで、操作した提示情報の重要性について検討を行っている。これまでに、本システムを用いた仮想空間での形状評価の合成的解析により、触覚情報が視覚情報とある程度類似している必要があること、視覚情報の遅延が細かな形状評価に影響を及ぼす可能性があること等が明らかにされている^{(4),(5)}。

3. 仮想空間での遠隔コミュニケーション

対面コミュニケーションでは、言葉による非 verbal 情報だけでなく、音声の周辺言語や傾き、手振り・身振りなどのノンバーバル情報が円滑なコミュニケーションに重要な役割を果たしている。

仮想空間での遠隔コミュニケーションの研究では、人間同士のコミュニケーションを合成的に解析するこ

(a) Setup of virtual communication system.

(b) Example of a scene of virtual communication.
Fig.3 Virtual communication system.

とを目的として、仮想空間を用いた身体的バーチャルコミュニケーションシステムを開発している(図3)

⁽⁶⁾。本システムでは、仮想空間上に対話者相互の分身(アバタ)であるバーチャルアクターが配置されている。バーチャルアクターの動きは、実空間の対話者の頭部、両手首、腰部に装着した磁気センサで位置・角度情報を計測し、反映している。また、対話者は仮想空間での視点を自由に設定でき、対話中の自己の振舞いを含むコミュニケーション場の視覚情報を得ることができる。本システムを用いて、仮想のコミュニケーション環境で、相手と自己のバーチャルアクターの空間的配置、視点、背景を自由に変化させて、身体動作、韻律情報、表情、顔色による情動変化の有無、それらのずれによる影響など、バーチャルアクターのノンバーバル行動の各種情報を除去、追加、加工してコミュニケーションを解析することが可能である。これまでに、本システムを用いた仮想空間でのコミュニケーションの合成的解析により、相手と自己のバーチャルアクターを同一仮想空間に投影する場面が両者のインタラクションを把握することができ、対話者相互の身体性が共有できるため好まれること等が示されている⁽⁷⁾。

4. 視点変更手法の検討

4.1 視点変更手法

仮想空間における3次元形状評価での協調作業では、自身による形状評価と相手とのコミュニケーションが重要な作業である。したがって、開発する協調作業支援システムでは、形状評価とコミュニケーション

のそれぞれ独立した作業を支援すると同時に、2つの作業支援が融合されていなければならない。第2・3章で述べたこれまでの研究で、仮想空間での3次元形状評価において自己の振舞いを投影する場合、自己のアバタの上半身が見える視点より前腕部が見える視点が好まれることが確認されている⁽⁸⁾。一方、仮想空間でのコミュニケーションでは、相手ばかりでなく相手と自己の振舞いや関係が分かり、空間を共有しているという実感が得られることが重要であることが明らかにされている。本研究では、これらの研究成果に基づき、仮想空間における3次元形状評価の協調作業において2つの作業視点を設定し、視点の切り替えにより形状評価とコミュニケーション支援の両立を図る。設定した視点は、図4(a)の相手のアバタと自己のアバタの前腕部が見える形状評価モードの視点と、図4(b)の相手のアバタと自己のアバタの上半身が見えるコミュニケーションモードの視点である。さらに、図4(a)の視点はユーザ自身のアバタの頭部にあり、ユーザの頭部動作が視点の動きに反映され、図4(b)の視点では、ユーザの頭部動作はアバタの頭部動作に反映されるが、視点はユーザ自身のアバタの背後の空間に固定されている。

開発する協調作業支援システムでは、図4に示す仮想空間の2つの作業視点を必要に応じて切り替えることが可能であり、なおかつ形状評価およびコミュニケーションに影響を及ぼさない必要がある。そこで、形状評価およびコミュニケーションに影響を及ぼさな

(a) Shape evaluation mode.

(b) Communication mode.

Fig. 4 Two modes of viewpoint for collaboration support.

Fig. 5 Viewpoint changing method by bending user's body.

Fig. 6 Button for changing viewpoint on the device.

いような視点の変更手法を協調作業支援システムに導入するために、2種類の視点変更手法について検討を行った。まず、手法Ⅰとしてユーザが体を前後に傾けることで視点を変更する手法を検討した(図5)。この手法では、ユーザが実空間で体を前後に傾けると、仮想空間のアバタがユーザの動きを反映し、アバタの頭の位置が基準点から一定量前後に移動することで作業視点の切り替えを行う。具体的には、前方に移動すると図4(a)の視点、後方に移動すると図4(b)の視点に切り替わる。また、手法Ⅱとして図6に示す手に持つデバイスに付加されたボタンを押すことで2つの作業視点を切り替える手法を検討した。この手法では、デバイスの上部に設けられたボタンを押すごとに、図4の2つの視点の切り替えが行われる。

4.2 実験方法および実験結果

実験は図2のシステムを用いて、各手法により約1分間、自由に視点の切り替えを行わせながら、被験者に図7に示す(a)EL, (b)Ec, (c)Ccの3つの3次元形状のうち2つを同時に提示し、形状の観察を行わせた。また、仮想空間での形状評価では、触覚情報として視覚情報とある程度類似した形状を提示する必要があることから⁽⁴⁾、被験者に与える触覚情報として実験で用いた形状の平均的な形状であるCcの光造形品を入力デバイスとして用いた。被験者は、男女学生10人である。まず、実験Ⅰとして視点変更手法Ⅰを、次に実験Ⅱとして、手法Ⅱの視点変更手法について検討

を行った。また、実験Ⅲ、Ⅳとして、手法Ⅰ、Ⅱそれぞれについて作業視点が Fig.4(a)と(b)で切り替わる際に、ズームアウトやズームインをするズーム機能を加えた視点変更の検討を行った。

[Photoforming product]

[3D model]

Fig.7 3D shapes used in sensory evaluation.

Fig.8 Sensory evaluation for viewpoint changing method.

実験Ⅰ、Ⅱの各実験終了後に、視点変更の行い易さについて5段階評価でアンケート調査を行った。結果を図8に示す。体を傾ける視点変更に比べてボタンを押す視点変更手法が支持されている。これら2つのデー

Table 1 Preference of viewpoint- changing method.

Method for Changing Viewpoint	Function	Without Zoom		With Zoom	
		1	2	1	2
Bending User's Body	Rank	0	2	1	2
Pushing Button	Rank	3	4	6	2

タを検定した結果、有意水準5%で有意差が認められた。次に、実験Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳを通して、どの視点変更手法が良かったか、一番良かったのものと次に良かったものを順位付けさせた結果を表1に示す。これより、10人中9人がボタンを押す視点変更手法が最良であると回答し、好まれることが明らかとなった。また10人中7人がズーム機能が有る方が良いと答えた。

5. ボタンによる視点変更手法の評価

5.1 実験システム

仮想空間での3次元形状評価の協調作業でのボタンによる視点変更手法の有効性を検討するために、図9に示す実験システムを用いて被験者と実験者による協調的形狀評価実験を行った。検討した視点変更手法では、ズーム機能を付加した。まず、被験者と実験者をそれぞれ別の部屋に入室させ、ネットワークで結ばれた仮想空間を共有させながら、コミュニケーションおよび形状評価を行わせた。被験者および実験者は磁気センサを頭部、両手首、腰部に装着し、さらに、被験者にはHMDを装着させ、磁気センサと視点変更用のボタンが付加された入力デバイスを手に持たせた。磁気センサから得られた被験者および実験者の動作データはイーサネットを介して互いのPCと送受信され、仮想空間上の相手と自己のアバタおよび3次元形状の動きに反映させている。被験者と実験者の会話のやり取りは、マイクから入力された音声ラインを通して送受信させている。また、被験者側のPCでは被験者の仮想空間での視点データを保存した。

Fig.9 Configuration of experimental system.

5.2 実験方法および結果

実験では、まず、被験者にシステムに慣れてもらうため、ネットワーク上の仮想空間で視点変更を自由

に行わせながら、実験者との遠隔対話を 3 分間行わせた。次に、実験者の操作により被験者に図 7 に示す (a)EL, (b)Ec, (c)Cc の 3 つの形状から 2 つを同時に提示し、実験者からそれぞれの形状の説明を受けた後、形状の評価を 1 分間行わせ、その結果を実験者に報告させた。形状評価は 3 通りの全ての組み合わせについて行った。被験者は男女学生 14 人である。実験の様子を図 10 に示す。全ての被験者に対して行った形状の一对比較による官能検査の結果を表 2 に示す。表中の数字は各列の形状の勝数、つまり各行の形状をより好ましいと答えた被験者の数を表している。これらの結果を用いて 3 次元形状の好ましさを定量的に評価するために次の Bradley-Terry モデルを想定した⁽⁹⁾。

$$P_{ij} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} \quad (1)$$

$$\sum_i \pi_i = \text{const.} (= 30)$$

π は形状の好ましさを表し、このモデルを想定することにより、一对比較に基づく好ましさの強さを一義的に定めることができる。得られた Bradley-Terry モデルによる形状の好ましさの強さ π を表 2 に示す。次に、このモデルの整合性を検定するのに有意水準 5 % で適合度検定を行い、さらに尤度比検定を行った。その結果、モデルは却下されず、好ましさの強さ π の値の妥当性が保証され、ボタンによる視点変更および視点変更の際のズーム機能が 3 次元形状評価に影響を及ぼさないことが示された⁽¹⁰⁾。

次に、実験の進行状況と被験者の視点の遷移の一例を図 11 に示す。形状評価実験は、1 つの形状の組み合わせにおける一对比較について、実験者による形状評価の対象となる 3 次元形状の説明、被験者による形状評価、被験者と実験者による評価結果のやり取りから構成されている。図 11 では被験者が形状評価時

には形状評価モードを、形状の説明・結果の報告ではコミュニケーションモードの視点を使用しており、視点変更機能が有効に利用されていることが分かる。また、図中の斜線部では、被験者は、形状評価を行っている間、形状評価モードの視点だけでなく、コミュニケーションモードの視点も使用しながら形状評価を行っていることが分かる。この傾向は他の被験者でも同様であった。このことから、被験者が形状評価を行いつつも、相手を意識し、自己の動きや相手と自己の関係の確認を行っていることが示唆される。

Fig.10 Experimental scene of collaboration in virtual space.

Table 2 Result of paired comparison on shape evaluation.

	El.	Ec.	Cc.	Total	π
El.		2	3	5	2.38
Ec.	12		2	14	7.01
Cc.	11	12		23	20.61

6. 協調作業支援システム

6.1 システムの特徴

これまでの研究成果から得られた知見に基づいて 2 人のユーザがネットワークで結ばれた仮想空間を共有し、相手および自己のアバタを介して 3 次元形状評

Fig.11 Experimental progress and transition of subject's viewpoint.

価と同時にコミュニケーションを行う協調作業支援システムを開発した(図 12)。本システムでは、ユーザの頭部、両手首、腰部に装着した磁気センサからの位置・角度情報を PC で処理し、仮想空間のアバタの動きに反映している。磁気センサから得られたお互いの動作情報とマイクから入力された音声情報は、イーサネットを介して互いの PC に送受信される。さらに、仮想空間での形状評価とコミュニケーションのそれぞれ独立した作業を両立するために図 4 の 2 つの作業視点を設定し、図 6 のボタンによるズーム機能付きの視点変更手法を用いて視点を切り替えることができる。

本システムを用いた形状評価では、仮想空間上に設置されたテーブル上に 2 種類の 3 次元形状が提示され、アバタの手と 3 次元形状が交わると、アバタの手に 3 次元形状が把持されると同時に、ユーザが手に持っている入力デバイスに内蔵されている磁気センサの角度情報が反映され、ユーザは様々な角度から形状を観察できる。また、自己のアバタが把持している 3 次元形状を相手に手渡ししたり、左右の手で持ち替えたりする操作も可能である。

Fig.12 Construction of collaboration support system for shape evaluation in virtual space.

6.2 システムの評価 I

6.2.1 実験方法

開発した協調作業支援システムを評価するために被験者 2 人 1 組による協調的 shape 評価実験を行った。被験者は男女学生 10 組 20 人である。2 人 1 組の被験者に図 12 のシステムを用いて、仮想空間で形状の観察、相手との形状のやり取りやコミュニケーションを行いながら協調的に形状評価させた。まず、被験者をそれぞれ別の部屋に入らせ、磁気センサを頭部、両手首、腰部に装着させた。さらに、HMD を装着させ、仮想空間の対象形状を操作するための、磁気センサと視点変更用のボタンが付加された入力デバイスを手に持たせた。

実験は、最初に仮想空間において図 7 に示す 5 種類の 3 次元形状から 2 つを同時に提示し、被験者 2 人でコミュニケーションしながらどちらの形状がより好ましいかを一対比較させた。また、視点の切り替えは被験者に自由に行わせた。仮想空間での実験風景と各被験者が見ている仮想空間の例を図 13 に示す。仮想空間での実験終了後、システムの使い易さ等に関するアンケートを行った。次に実空間において被験者にテーブルを挟んで対面して椅子に座らせ、図 7 に示す 3 次元形状の光造形品を提示して、仮想空間と同様に一対比較を行わせた(図 14)。仮想空間、実空間ともに形状評価は全ての組合せ、それぞれ合計 10 組について一対比較を行わせた。

Fig.13 Experimental scene in virtual space.

Fig.14 Experimental scene in real space.

6.2.2 官能検査結果

仮想空間、実空間における形状の好ましさにについての一対比較の結果を表 3 に示す。これらの結果を用いて 3 次元形状の好ましさを定量的に評価するために、前述の Bradley - Terry モデルを想定し、このモデルの整合性を検討するために有意水準 5 % で適合度検定を行った。その結果、モデルは却下されず、好ましきの強さ π の値の妥当性が保証された。さらに、実空間と仮想空間での形状の好ましきの比較を行うために、実空間の実験結果から得られた形状の好ましきの強さ π の値を用いて仮想空間での一対比較の結果について適合度検定を行った。その結果、実空間での形状の好ましきのモデルが仮想空間でも有効であることが確認さ

Table 3 Result of paired comparison on collaborative shape evaluation.

(a) in virtual space.

	El.	Ec.	Cc.	Dc.	Hc.	Total	π
El.		2	0	2	2	6	1.01
Ec.	8		3	3	4	18	3.68
Cc.	10	7		8	7	32	14.63
Dc.	8	7	2		5	22	5.34
Hc.	8	6	3	5		22	5.34

(b) in real space.

	El.	Ec.	Cc.	Dc.	Hc.	Total	π
El.		2	1	2	3	8	1.42
Ec.	8		4	3	4	19	4.18
Cc.	9	6		10	7	32	14.75
Dc.	8	7	0		7	22	5.48
Hc.	7	6	3	3		19	4.18

れた。このことより、本システムの仮想空間において、協調的に形状評価が可能であることが示された。

6.2.3 アンケート結果

仮想空間での実験終了後、本システムの使い易さおよび本システムを用いた協調的形状評価に関する7項目の質問について5段階評価でアンケートを行った。結果を図15に示す。形状の操作の行い易さ以外の項目については、肯定的な回答が得られ、本システムの有効性が示された。しかし、操作の行い易さの項目については、仮想空間でテーブルの上に提示された3次元形状を把持する操作や相手との3次元形状の手渡しが難しいという意見が多く、システムの改善の余地がある。

Fig.15 Result of questionnaire.

6.3 システムの評価 II

6.3.1 実験方法

前節では、開発したシステムを実空間でのコラボレーションと比較して評価を行ったが、さらに、別の仮想空間を用いた簡便な形状評価システムとの比較を行った。被験者は男子学生5組10人である。比較に用いた形状評価システムは、PCと家庭で用いられている一般的な装置を用いて構成されており、磁気センサやHMDは使用していない(図16)。このシステムでは、マウスを操作して仮想空間の視点を移動させ評価の対象となる形状を観察する。また、遠隔地のユーザーと仮想空間は共有されず、通信は音声のみである。

実験は、まず図16のマウス操作によるシステムを用いた仮想空間において図7に示す5種類の3次元形状から2種類を同時に提示し、どちらの形状が好ましいか、音声のみのコミュニケーションをしながら二者択一させた。全ての形状の組み合わせについて一対比較させた後、図12の協調作業支援システムを用い、同様の形状評価を行わせた。

(a) System configuration.

(b) Example of display.

Fig.16 Comparing system.

6.3.2 実験結果

それぞれのシステムを用いた仮想空間での一対比較の結果に対して前述の Bradley-Terry モデルを想定しモデルの整合性を検定した結果、どちらのシステムを用いた仮想空間においても形状評価が可能であることが示された。

実験終了後に行った2つのシステムを比較したアンケート調査の5段階評価の結果を図17に示す。全

Fig.17 Result of questionnaire.

ての項目において開発した協調作業支援システムが優位であり、とくに相手の存在感、コミュニケーションや意思の決定のやり易さについては、被験者全員が開発したシステムの方が良いと回答した。

7. おわりに

本研究では、これまで行ってきた仮想空間での3次元形状評価およびコミュニケーションの研究成果から得られた知見を基に、複数のユーザが仮想空間を共有し、コミュニケーションを行いながら、円滑に3次元形状評価が行える協調作業支援システムを開発した。まず、仮想空間での3次元形状評価とコミュニケーション支援を両立するために、2つの作業視点を設定し、その切り替え手法について検討を行った。その結果、ボタンによる視点変更手法が好まれた。次に、視点変更機能を取り入れた仮想空間における3次元形状評価のための協調作業支援システムを開発し、実空間での協調作業および、簡便な協調作業支援システムとの比較実験を行った。その結果、開発したシステムの仮想空間で、協調的に形状評価が可能であることが確認され、システムの有効性が示された。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究C(2)14550241の補助によるものである。

参考文献

- (1) 宮川, 荒川, 山川: スーパーバイズエージェントによる協調設計に関する研究; 日本機械学会第9回設計工学・システム部門講演会論文集, pp.134-137 (1999) .
- (2) 山田 他: 力覚グリッドを用いた3次元空間の直接操作; 日本機械学会第10回設計工学・システム部門講演会論文集, pp.318-322 (2001) .
- (3) 松下, 岡田: コラボレーションとコミュニケーション, 共立出版(1995).
- (4) 大久保, 渡辺: 仮想空間における3次元形状評価のための視線-行為連動システム; 日本機械学会論文集(C編), Vol.67, No.660, pp.230-236 (2001) .
- (5) 大久保, 渡辺, 伊藤, 久保木: 仮想空間での3次元形状評価における視覚情報の遅延の影響; 日本機械学会論文集(C編), Vol.69, No.684, pp.124-129 (2003).
- (6) 渡辺, 大久保: 身体的コミュニケーション解析のためのバーチャルコミュニケーションシステム; 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.2, pp.670-676 (1999) .
- (7) 渡辺, 大久保, 石井, 中林: バーチャルアクターとバーチャルウェーブを用いた身体的バーチャルコミュニケーションシステム; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.2, No.2, pp.1-10 (2000) .
- (8) 久保木, 大久保, 渡辺: 仮想空間3次元形状評価における自己の振舞いの投影の影響; 日本機械学会2002年度年次大会講演論文集, Vol. V, pp.253-254 (2002) .
- (9) 芳賀, 橋本: 統計解析プログラム講座3 実験データの解析(1); 日科技連出版(1989).
- (10) 大久保, 渡辺, 久保木: 仮想空間3次元形状評価のための協調作業支援システムにおける視点変更; 第12回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp.254-255 (2002) .