

両眼立体視とキャストシャドウの提示がVR空間におけるPick-and-Place Taskに与える影響

石井 雅博*・関谷 尊範*・唐 政*・長谷川晶一**・佐藤 誠***

* 富山大学大学院知能情報工学専攻 〒930-8555 富山市五福 3190

** 電気通信大学知能機械工学科 〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1

*** 東京工業大学精密工学研究所 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

Effect of Displaying Stereopsis and Cast Shadows on Pick-and-Place Task in Virtual Space

Masahiro ISHII*, Takanori SEKIYA*, Zheng TANG*, Shoichi HASEGAWA** and Makoto SATO***

* Department of Intellectual Information Systems Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555

** Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu 182-8585

*** Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 226-8503

Objects occluding the light source from above cause cast shadows on a floor. Cast shadows are effective in perceiving 3D space. Meanwhile, binocular cues are widely used for virtual reality applications to give better 3D structures. Here, the authors determine the efficiency of these cues to perform pick-and-place task in a virtual space by presenting them in isolation from other visual cues. When only cast shadows were available, the performance was high. However, when only binocular cues were available, the performance was low. No additional increase was found when both cues were available simultaneously.

Key words: cast shadows, stereopsis, virtual reality

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) は、コンピュータによって生成した情報を視覚や聴覚などの感覚器官を介して人間に提示し、情報を直感的に理解できるようにするとともに、人間の身体動作によって情報を操作できるようにする技術である¹⁾。VRは、情報の可視化、訓練、医療、芸術、軍事、航空宇宙、教育、建築、コミュニケーション、アミューズメントなど多岐にわたる分野への応用が期待され、多くの研究がなされている。VRの特徴のひとつは、前述したように、ユーザーがVR空間に対して働きかけを行うことである。

人間が外界に対して働きかけを行うとき、人間と外界とのかかわりは以下のような3つの段階からなり、これらが循環を形成する。

(a) 人間は視覚や聴覚などの感覚器官を通して外界の状態を知る。

(b) 人間は自らの身体を用いて外界に働きかけを行う。

(c) 外界に変化が生じる。(aへ戻る)

人間が所望の行動を達成するためには、この循環が円滑に進む必要がある。段階(a)は、この循環の初段に位置しトリガーとして重要な意味を有するだけでなく、行動のパフォーマンスを左右する要因のひとつでもある。たとえば、人間の空間構造把握の精度が低ければ、動作の準備や動作後の効果確認に瑕疵が生じ、パフォーマンスが低下する。

VR空間内においてユーザーに行動させるときも、上述した循環を開始させ、それが円滑に継続するようにしなければならない。また、実世界と同様に、ユーザーの空間把

E-mail: ishii@eng.u-toyama.ac.jp

握の精度が不十分であれば、十分なパフォーマンスは期待できない。そこで本研究では、VR空間を表示するために用いられる視覚情報（手がかり）の違いがVR空間での基本的な作業のパフォーマンスに及ぼす影響を調べた。

2. 立体感の提示

われわれは三次元世界で生活しており、目で見える世界も三次元的に感じている。しかし視覚情報の入り口である網膜は二次元的なセンサーであり、視覚世界が三次元的に感じられるのは脳が三次元的な世界を作り上げているからである。このとき脳は二次元的な情報から三次元の世界を構築するために、複数の情報源（手がかり）を用いている。具体的には、遠近法や重なりといった絵画的情報、両眼網膜像差による立体視、運動視差による立体視、輻輳および調節に関連する眼筋の状態などを統合して三次元構造を把握している²⁾。VRシステムでは、これらの視覚情報を人工的に生成（CG）しユーザーに提示することでVR環境を提供している。

3DCGのグラフィックスライブラリーであるOpenGLやDirect3Dなどを用いれば、遠近法や重なりなどの絵画的情報を容易に生成できる。これらのグラフィックスライブラリーは両眼網膜像差による立体画像の生成も可能であるが、その提示にはHMD、立体視用ゴーグル、あるいはパララックスバリアー式立体ディスプレイなどの装置（専用のハードウェア）が必要となる。なお、両眼網膜像差を利用すれば輻輳を制御することも可能であるが、調節との矛盾に注意を要する。輻輳と調節との乖離が大きくなると融像ができなくなったり、眼疲労が生じたりする。また、グラフィックスライブラリーを用いて視点位置を継続的に変化させれば運動視差による立体情報の提示も可能であるが、頭部位置をリアルタイムに計測するための装置（センサー）が必要となる。なお、運動視差による立体視では頭部運動がおおよそ100 mm/s以上でその効果がみられる³⁾。調節に対応したディスプレイも提案されているが、非常に特殊な装置である⁴⁾。なお、奥行き知覚における調節の役割は非常に小さいが、輻輳と調節の矛盾を解消できるので眼疲労の低減が期待できる。

小規模のVRシステムでは、OpenGLやDirect3Dなどを用いて遠近法や重なりなどの絵画的情報を生成し、2Dディスプレイに表示することがほとんどである。システム規模の拡大とともにまず両眼立体視が、次いで頭部位置計測が追加されるケースが多い。頭部運動の補償を行わないシステムにおいて両眼立体像を観察しながら頭部を移動させると、移動しないはずの視対象が移動して知覚されてし

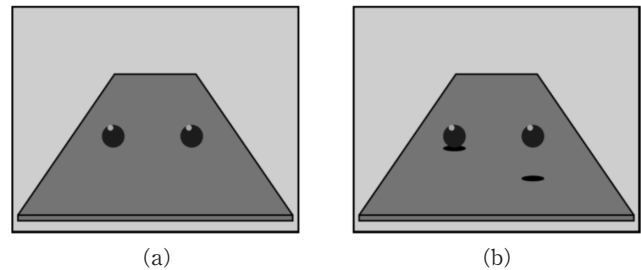


Fig. 1 Effect of cast shadows in perceiving 3D space. (a) Without shadows, (b) with shadows.

まうという問題が生じる。頭部運動を計測しその結果をVR空間表示に反映させることは奥行き感の提示のためだけでなく、安定したVR空間提示のためにも有効である。

上方からの光が物体によって遮られると床面に影が落ちる。この影はキャストシャドウとよばれ、奥行き知覚に有効である^{5,6)}。Fig. 1は、床面と2つの球からなるVR空間を示す。左図はキャストシャドウの提示がない場合、右は提示がある場合である。床面と球の位置関係の知覚において、キャストシャドウの提示が有効であることがわかる。キャストシャドウは絵画的情報であり、CG（ソフトウェア）で実現可能である。

本研究では、VR空間を提示するために用いられる視覚情報として両眼立体視とキャストシャドウを取り上げ、これらの提示がVR空間での基本作業に及ぼす影響を調べる。提示された視覚情報から獲得した三次元空間の構造が正確であるならば、VR空間内における作業時間が短縮すると予想できる。

3. 実験

3.1 目的

本研究では、ユーザーに提示する視覚情報の違いがVR空間の三次元空間構造把握に及ぼす影響を調べる。ユーザーに提示する視覚情報は以下の4条件とした。

- 3DCGによって生成されたVR空間を2Dディスプレイに表示する場合（base条件）
- base条件に両眼立体視を付加する場合（+stereo条件）
- base条件にキャストシャドウを付加する場合（+CS条件）
- base条件に両眼立体視とキャストシャドウを付加する場合（+both条件）

本研究では空間構造把握の正確さを調べるのが目的であるが、知覚された奥行き量などを心理物理学的手法によって調べるのではなく、被験者に作業を行わせそのパフォ

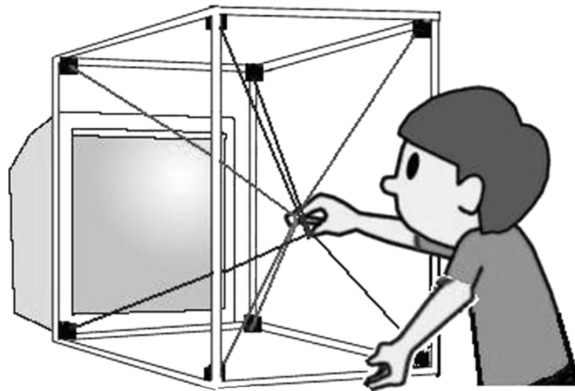


Fig. 2 SPIDAR.

パフォーマンスを計測する。これは、空間構造の把握が正確であれば、作業のパフォーマンスが向上すると考えられるからである。また VR では、ユーザーが VR 空間に働きかけることが重要な要素であり、知覚心理学的アプローチだけでなく、このような実験を行うことで VR 空間における情報提示の効果を実質的に計測できると考える。

VR 空間におけるユーザーによる働きかけは、ユーザー自身に対する動作、および、物体に対する動作、の 2 つに大別できる。前者の例はウォークスルー環境における移動や HMD 装着時の見回し動作などであり、ユーザーと視対象とは離れた位置にある。後者の例は物体の変形や物体の移動などであり、対象はユーザーの操作可能な近い場所に存在する。本研究で取り扱う両眼立体視では、その効果が強いのは比較的近距离であるので、ユーザーの手の届く範囲での作業を実験対象とした。

3.2 実験方法

3.2.1 装置

本研究で使用する実験システムは、視覚情報を提示するための表示装置、ユーザーによる VR 空間内の物体操作を可能にするインターフェース装置、およびこれらを統合・制御するパーソナルコンピュータからなる。表示は 21 型 CRT ディスプレイを用いた。ユーザーとディスプレイの距離は 70 cm であった。両眼立体像は液晶シャッターゴーグルを用いた時分割方式によって提示した。右眼用、左眼用の映像は 1 秒間に 45 フレームずつ交互に、合計して毎秒 90 フレーム表示した。被験者の頭部を固定するために顎台を用いた。物体操作のインターフェースは、糸を用いた力覚インターフェース装置 SPIDAR⁷⁾ であった (Fig. 2)。

3.2.2 ソフトウェア

VR 空間の制御 (リアルタイムシミュレーション) には体積ベースパナリティ法による物理エンジンを用い

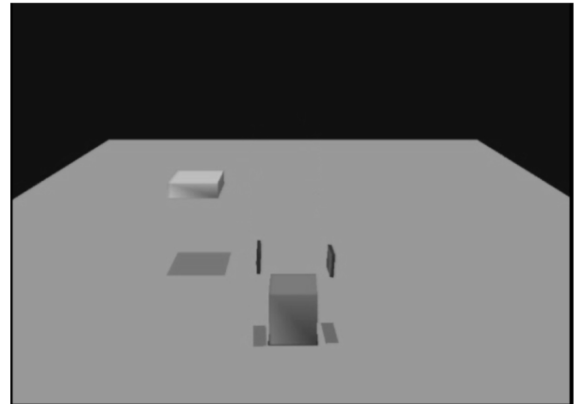


Fig. 3 VR space for experiment.

た⁸⁾。また、マイクロソフト社 DirectX によって VR 空間を描画した。両眼立体視用のステレオ CG は nVIDIA 社の環境を用いた。キャストシャドウは、対象物体直下の他の物体上に黒色半透明の板状物体を配置することで実現した。

3.2.3 VR 空間とタスク

実験における被験者のタスクは、VR 空間に置かれた物体を持ち上げて、指定された位置に配置し直す pick-and-place task とした。Fig. 3 に実験環境である VR 空間を示す。空間内には 3 つのオブジェクトを配した。それぞれ、作業台 (床面)、ユーザーの操作対象である立方体形状の物体、厚板状の目標台である。立方体は床面に置かれ、ユーザーが操作することができる。ユーザーが立方体を移動し配置すべき場所 (ゴール) が目標台である。目標台は作業台の上方に浮かぶように設置されている。図中の 2 枚の小さな板状の物体はポインター (仮想の指先) であり、ユーザーはこれらを利用して作業を行う。VR 空間内における作業台の大きさは 60 cm × 60 cm、立方体の 1 辺は 4 cm であった。目標台の 1 辺は 5 cm、厚さは 1.5 cm と設定した。

作業台の被験者側の縁は被験者から 50 cm、反対側の縁は 110 cm と設定した。すなわち、作業を行う VR 空間の中心部分はディスプレイ面よりも 10 cm 奥 (被験者からは 80 cm) にあった。ポインターが VR 空間の中心位置にあるとき、被験者の手の位置は、被験者の胸の前方 30 cm の位置にあった (SPIDAR の中心)。被験者が VR 空間を観察するとき、自身の手は周辺視でとらえることができた。被験者の手は、被験者の目と VR 空間とを結ぶ線よりも下方にあったため、VR 空間の観察を妨げなかった。

3.2.4 被験者

本実験の前に、両眼網膜像差による立体視の能力が認め

られる被験者を選別する実験を行った。選別実験では、暗黒の VR 空間内に 2 つの立方体のみを提示し、液晶シャッターゴーグルでその立体像を観察させ、2 つの立方体間の奥行きを応答させた。2 つの立方体は被験者から約 80 cm の位置に左右に並んで空間内に浮かぶように配置され、両眼網膜像差によって互いに奥行きが与えられた。また、これらは画面上での大きさが等しくなる（視角で 4°）ように提示された。両者の水平方向間隔は 1 cm（視角で 0.8°）であった。両者の相対的奥行きを変化させ、知覚された奥行き量を調べた。提示した相対奥行き量は 1 cm、2 cm、あるいは 3 cm であり、これを継続的に提示した。2 つの立方体の前後関係を 90% 以上の割合で正しく応答し、さらに、応答する奥行き量が提示した相対奥行き量の増減に応じて増減するものを本実験の被験者を選んだ。選別実験には 5 名の被験者が参加した。

選別され本実験に参加した被験者は 3 名であった（KS, HS, KR）。なお、選別された被験者は SPIDAR の操作体験がない者であった。

3.2.5 手順

被験者は、各試行の開始後、なるべく早く立方体を目標台の上に配置するように求められた。実験の各試行で、立方体および目標台の初期位置をランダムに変えた。立方体が出現する位置の範囲は作業台上の中央部 12 cm×12 cm の領域内であった。目標台が出現する高さの範囲は作業台の上空 4 cm～12 cm、位置は 20 cm×20 cm の領域内であった。base 条件、+CS 条件、+stereo 条件、+both 条件についておのおの 10 試行を行った。なお、操作慣れなどの順序効果を妨げるため、1 試行ごとに各条件がランダムに選択され実験が進められた。本実験の前に約 3 分間のトレーニング試行を行った。本実験では作業時間を計測した。作業時間は、各試行の開始から立方体が目標台に置かれる（被験者が立方体を放す）までの時間である。

3.3 結果

結果を Fig. 4 に示す。横軸は、被験者(KS, HS, KR) および提示した視覚情報の違い (base, +stereo, +CS, +both) を示す。縦軸は平均作業時間である。エラーバーは標準偏差である。

作業時間を従属変数として、キャストシャドー×両眼立体視の 2 要因分散分析を行った。すべての被験者において、両眼立体視および交互作用の効果は認められず、キャストシャドー提示の効果が認められた。被験者 KS では、両眼立体視： $F(1, 36)=2.28$ (*n.s.*), CS： $F(1, 36)=80.5$ ($p<.01$), 交互作用： $F(1, 36)=2.28$ (*n.s.*), 被験者 HS では、両眼立体視： $F(1, 36)=1.39$ (*n.s.*), CS： $F(1, 36)=$

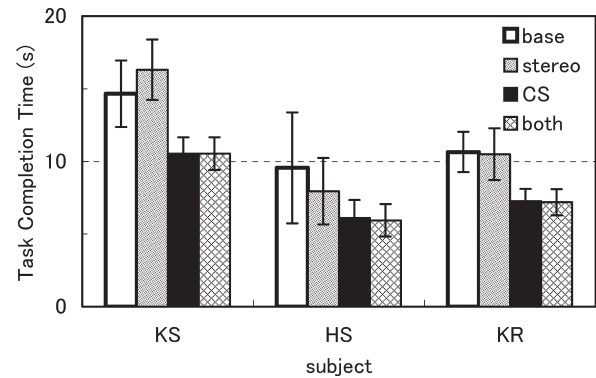


Fig. 4 Task completion time.

13.2 ($p<.01$), 交互作用： $F(1, 36)=0.94$ (*n.s.*), 被験者 KR では、両眼立体視： $F(1, 36)=0.08$ (*n.s.*), CS： $F(1, 36)=67.7$ ($p<.01$), 交互作用： $F(1, 36)=0.01$ (*n.s.*) であった。すべての被験者において、キャストシャドーを与えた条件で作業時間の短縮が認められたが、両眼立体視の提示は作業時間の短縮に影響しなかった。

前述したように、実験での VR 環境はリアルタイム物理シミュレーターによって制御されている。被験者が目標台上において立方体を放した後、立方体の振る舞いはシミュレーターによって決定される。たとえば、立方体が目標台よりも高い位置で開放されると、立方体は目標台に跳ね返って作業台に落ちてしまう。また、立方体が十分に低い位置で開放されたとしても、立方体の重心が目標台の中に入っていなければ、やはり目標台から落下してしまう。被験者に置かれた立方体が目標台の上にとどまった割合を Fig. 5 に示す。横軸は被験者および実験条件、つまり提示した視覚情報の違いを示し、縦軸はとどまった割合である。4 条件のグラフの比較から、+CS 条件および+both 条件での成功率が高く、base 条件および+stereo 条件での達成率が低いことがわかる。被験者 KS では、+stereo 条件の成功率が base 条件よりも悪化している。base 条件では奥行きを知る情報が非常に乏しく、被験者は立方体と目標台との位置関係を力覚によって確かめてから物体を放していた。それに対して+stereo 条件では両者の相対的な奥行きが知覚できるため、被験者は力覚による事前確認をせず、視覚情報で判断して立方体を放していた。しかし、知覚された位置関係の精度が十分でなかったため作業が失敗したと思われる。

4. 考察

Watt と Bradshaw⁹⁾ は物体を VR 空間内に提示し、被験者には液晶シャッターゴーグルを装着して立体視させ、

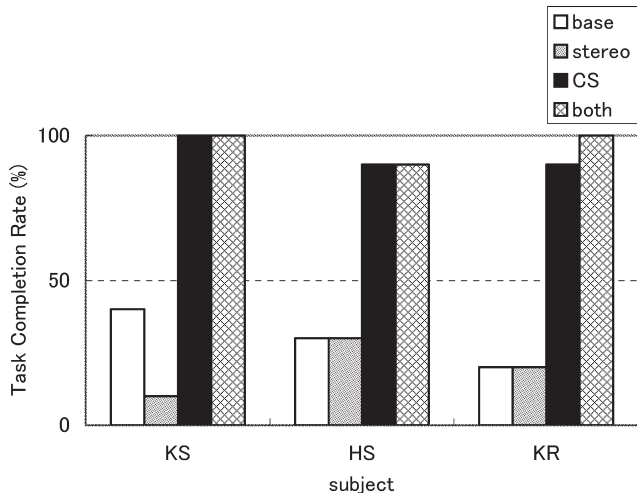


Fig. 5 Task completion rate.

VR 空間内の物体を手で取るように求めた。提示した奥行き情報としては、両眼網膜像差単独、運動視差単独、両眼網膜像差と運動視差の両方、の3条件が設定された。reaching 時の手の移動速度（距離に比例して増加する）を奥行き距離知覚の指標とした。また、把持直前（preshaping）の親指-人差し指間隔（物体の大きさに比例して増加する）を物体の大きさ知覚の指標とした。実験の結果、両眼網膜像差単独の提示では物体の奥行きと大きさの両方が正確に知覚されること、運動視差単独の提示では物体までの奥行き知覚は正確であるが、物体の大きさ知覚が正確ではないこと、両眼網膜像差と運動視差の両方が提示される条件では、両眼網膜像差単独の提示と同様の正確さしか得られないことなどが明らかにされた。これらの結果から、両眼網膜像差と運動視差は奥行き知覚の情報として、ほぼ同等の効果を有するが、物体の大きさ知覚に関しては両眼網膜像差が強い効果をもっていると結論した。

本研究では、両眼網膜像差の付与によって作業時間の短縮は確認できなかった。本研究における実験の被験者課題は、Watt と Bradshaw の課題よりも複雑な pick-and-place task であり、作業達成には、特に VR 空間内の物体同士の位置関係に対するより正確な知覚が必要だったと思われる。キャストシャドウはこのような課題の達成に有効であることがわかった。

キャストシャドウを手がかりとしたときの被験者の方略は以下のようなものであろう。目標台のおおよその位置はキャストシャドウによって確認できるので、まず立方体をその上空まで運ぶ。このとき目標台および立方体のシャドウの位置関係も手がかりとして用いられるであろう。次に、微細な位置決めでは目標台の上に落ちる立方体のシャ

ドウが強い手がかりとなる。

本研究では、両眼立体視の正視者を被験者として実験を行ったにもかかわらず、両眼立体視の効果は認められなかった。今回の実験では、一般的なグラフィックスライブラリーを用いて VR 空間をレンダリングしているため、視覚刺激を厳密に統制することは困難であった。そのため、両眼網膜像差が作る VR 空間の奥行き情報が被験者に正しく受容されていない可能性を排除できない。たとえば、奥行き感が過大あるいは過小に知覚されたため、作業課題へのパフォーマンス向上の効果が現れなかった可能性がある。両眼立体視は奥行き知覚に対する強力な手がかりであり、これを疑う余地はない。両眼立体視が VR 空間提示における有効な技術となるためには、さらなる研究および開発が必要である。

5. おわりに

本研究の実験では、作業台（床）の上でのタスクを取り上げたため、物体やポインターのキャストシャドウが発生し、被験者はこれを作業達成に利用することができた。しかしながら、床のない VR 空間では当然キャストシャドウは発生せず、これを知覚の助けに利用することはできない。VR 空間内における作業のパフォーマンスを向上するには、このような場合にも有効な視覚（あるいはその他の感覚）情報提示手法を考案していく必要があるだろう。

また本研究では、手の届く範囲の物体に対する働きかけを対象として奥行き知覚の検討を行った。VR ではウォークスルーなどの等身大の環境も重要な研究分野であり、このような場面での知覚特性についても検討する必要がある。

本研究における実験では、対象物体直下の他の物体上に黒色半透明の板状物体を配置することでキャストシャドウを実現した。VR 空間内の物体数が少なく、それらの形状が単純な場合にこの手法は有効であるが、一般的な VR 空間はもっと複雑である。そこで、複雑な VR 空間に対してキャストシャドウの提示が簡単に実現できるようなアルゴリズムの開発が必要であろう。また実験では、VR 空間はアンビエント光によって描画し、キャストシャドウはこの光環境とは無関係に設定した。この措置は、VR 空間の見やすさとキャストシャドウの見やすきの両立を目的としたものであった。このような描写に対して、ほとんどの者は不自然さを感じないが、絵画デッサン経験者は大きな違和感をもった。絵画デッサン経験者の奥行き知覚特性を調べるとともに、より自然なキャストシャドウ生成の方法を検討する必要がある。

交差視差あるいは非交差視差のどちらかによる立体視ができない両眼立体視異常は人口の約 30% の者に生じ、両眼立体視能力を完全に欠いている者は約 3% と報告されている¹⁰⁾。ユニバーサルデザインの立場からも VR 空間提示におけるキャストシャドウの利用は有用である。

Watt と Bradshaw の研究や本研究の結果からわかるように、複数の奥行き情報を同時に提示することで高い認知効果が期待できる。複数の奥行き情報が提示されると脳はそれらを統合するが、統合の方法はさまざまである^{11,12)}。脳は、信頼性の高い情報には高い重み付けを与えて、その結果を線形的に足し合わせるケースが多いが、そうではないケースもある。また、個人差¹³⁾もあり注意を要する。VR 空間設計者の意図した構造を正確にユーザーに伝達するためには、視覚系の特性をさらに明らかにしていく必要があるだろう。

文 献

- 1) D. Zeltzer: "Autonomy, interaction and presence," Presence: Teleoper. Virtual Environ., **1** (1994) 127-132.
- 2) I. P. Howard and B. J. Rogers: *Seeing in Depth*, Vol. 1 (Porteous, Toronto, 2002).
- 3) H. Ujike and H. Ono: "Depth thresholds of motion parallax as a function of head movement velocity," Vision Res., **41** (2001) 2835-2843.
- 4) 杉原敏昭, 宮里 勉, 中津良平: "焦点調節補償機能を有する HMD", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **4** (1999) 261-268.
- 5) D. Kersten, D. C. Knill, P. Mamassian and I. Bulthoff: "Illusory motion from shadows," Nature, **379** (1996) 31.
- 6) 北島律之, 竹田 仰: "両眼視差とキャストシャドウによる奥行き知覚の相互作用", 映像情報メディア学会誌, **56** (2002) 1795-1802.
- 7) 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘: "空間インターフェース装置 SPIDAR の提案", 電子情報通信学会論文誌, **J74-D-II** (1991) 887-894.
- 8) 長谷川晶一, 藤井伸旭, 赤羽克仁, 小池康晴, 佐藤 誠: "力覚インタラクションのための多面体の接触体積に基づく実時間剛体運動シミュレーション", 計測自動制御学会論文集, **40** (2004) 122-131.
- 9) S. J. Watt and M. F. Bradshaw: "The visual control of reaching and grasping: Binocular disparity and motion parallax," J. Exp. Psychol.: Hum. Percept. Performance, **29** (2003) 404-415.
- 10) W. Richards: "Stereopsis and stereoblindness," Exp. Brain Res., **10** (1970) 380-388.
- 11) E. B. Johnston, B. G. Cumming and A. J. Parker: "Integration of depth modules: Stereopsis and texture," Vision Res., **33** (1993) 813-826.
- 12) M. Ichikawa, S. Saida, A. Osa and K. Munechika: "Integration of binocular disparity and monocular cues at near threshold level," Vision Res., **43** (2003) 2439-2449.
- 13) 佐藤雅之: "奥行き次元の同時対比効果と Cornsweet 錯視における異方性と個人差", 光学, **33** (2004) 667-677.