

# ステレオ立体視環境での疑似透過知覚に関する心理物理学的検討

大槻 麻衣<sup>\*1</sup> Paul Milgram<sup>\*2</sup>

## Psychophysical Exploration of Pseudo-Transparency in Stereoscopic environment

Mai Otsuki<sup>\*1</sup> and Paul Milgram<sup>\*2</sup>

**Abstract** - We report a two part experiment related to perceiving (virtual) objects in the vicinity of (real) surfaces when using stereoscopic augmented reality displays. In particular, our goal was to explore the effect of various visual surface features on both perception of object location and perception of surface transparency. Surface features were manipulated using random dot patterns on a simulated real object surface, by manipulating dot size, dot density, and whether or not objects placed behind the surface were partially occluded by the surface.

**Keywords:** Human factors, stereoscopic augmented reality, pseudo-transparency, and visual perception

### 1. はじめに

拡張現実感 (Augmented Reality; AR) 分野における実用的なアプリケーション例として、手術支援システム [2][3][4][8][9][10] がある。こうしたシステムでは、人体内部にある腫瘍や重要な器官を仮想物体として現実の光景に重畳描画することで、現実であれば手前の物体に遮られて見えないはずの内部の物体を同時に観察できる。

ここで、da Vinci® Surgical System システムのような、ステレオカメラとステレオ立体視可能なディスプレイを備えたシステムを用いる場合 (あるいはビデオシーラー型 HMD やディスプレイを用いる場合も同様である)、両眼視差からは「仮想物体は実物体よりも奥にある」と知覚される。一方、遮蔽手がかりからは「実物体表面は不透明であり、連続しているため、そのままでは内部は見えないはずである。よって見えている仮想物体は実物体よりも手前にある」とも知覚されてしまう [6]。そのため、2 つの知覚の間で矛盾が生じ、結果として仮想物体の奥行きが正しく知覚できない。

この問題を解決するために、手前の物体表面を半透明で描画する Dynamic transparency [5] や、実物体表面を加工して描画し、内部の仮想物体の観察を容易にする pq-space rendering [8] が提案されている。Transparency [6] という単語そのものについては、先述の Dynamic transparency [5] の他にも、Semi-transparency [3], Pseudo-transparency, Translucency, Stereo-transparency [1][13] といった単語がある。文献 [12] では、Pseudo-transparency (以降「疑似透過」と呼称する) は、ある物体が不透明な素材からできていても、それがレース状になっていて光が透過する場合は、その物体の向こ

う側が透けて見え (例: 網戸), 一方, Stereo-Transparency はステレオ立体視によって、先述のように、両眼視差をもとに、実物体よりも奥にある仮想物体を観察できる。

本研究ではこの両方のコンセプトを融合した、“Stereoscopic pseudo-transparency” (ステレオ疑似透過) という単語を用いる。

本研究では、ステレオ立体視可能なシステムを用い、ランダムドットによって作成した仮想のマスクを実物体の上に重畳描画し、そのマスク越しに内部の仮想物体を観察する。これによりあたかも「手前の物体が透明になった」ように知覚され、結果として、背面にある仮想物体の奥行き知覚が容易になる。

図 1 に実物体のポーチの内部に仮想の矢印を配置し、そのまま実物体の上に重畳描画したステレオ画像の例と、



(a) 仮想物体の矢印を実物体のポーチの上に重畳描画した場合



(b) 提案手法によってランダムドットマスク越しに矢印が見えるように描画した場合

図 1 ステレオ立体視可能な環境において、実物体のポーチの内側に仮想の矢印を配置し、重畳描画した例。この例では、交差法用に図を配置している (右目で左図, 左目で右図を見る方式)。

\*1: 筑波大学

\*2: University of Toronto

\*1: Tsukuba University

\*2: University of Toronto

ランダムドットマスクを用いた例を示す。

(a) では、冒頭で述べた通り、両眼視差からは矢印がポーチの「内側」にあるように知覚されるが、ポーチ表面が均一な素材、かつ連続しているため、遮蔽手がかりからは、矢印はポーチより「手前」にあるようにも知覚され、知覚に矛盾が生じる場合がある。一方で、(b) ではランダムドットマスクにより、矢印はポーチ内部にあると知覚しやすくなっている。

我々は、このマスクのデザインを様々に変更し、2種類の系統的な実験によってその特性を分析した。本稿ではその結果を報告する。

## 2. 実験準備

### 2.1 実験概要

実験 1 では、仮想物体が実物体表面近くにある場合に、マスクデザインによって知覚バイアス、および奥行き知覚の感度がどのように変化するかを調査する。

実験 2 では、仮想物体が常に実物体の背面にある場合に、マスクデザインによって「実物体が透明に感じられるかどうか」「物体が背面にあると知覚できるかどうか」の尺度値がどのように変化するかを調査する。

### 2.2 刺激の作成と提示

全ての刺激は Windows 7 Professional OS, Intel Core i5 2310 2.8 GHz CPU, 8G RAM, NVIDIA Quadro 600 を搭載した PC を用い、Visual C++ 2010, グラフィックライブラリには OpenGL を用いて実装したソフトウェアによって作成した。各刺激は 23 インチ LCD ディスプレイ (ASUS VG236HE, 解像度 1920 x 1080, リフレッシュレート 120 Hz), NVIDIA 3D vision system, 3D Vision 2 glasses を用いて提示され、被験者は刺激を立体的に観察可能である。実験の様子を図 2 に示す。なお、部屋の明るさは 350~500 lux であった。

実験で用いた刺激の例を図 3 に示す。ここではランダムドットマスクを手前の実物体に重ねた、手前の物体とマスクのドットが混在する領域を Masking window と呼称した。この領域のサイズは 140 x 140 pixel である。また、刺激の提示範囲は 200 x 490 pixel とした。

1 章において「実物体」と述べたが、実験では便宜上、「シミュレートされた実物体」として単色（肌色）の仮想の平面を用いた。この平面は、ステレオ立体視した時に視差 0 の位置に表示される。仮想物体は、水色の円を用い、単色平面の前面（被験者側）、あるいは背面に配置した。以降、本論文ではプログラム上での単位（1 単位 = 116.5 mm）を使用する。

実験では、Masking window におけるドットサイズ、ドット密度を様々に変更した。ドットサイズは Masking window の 1 辺を何分割したか（例：1/20 の場合はランダムドットパターン生成に 20x20 のグリッドを使用した）



図 2 実験風景

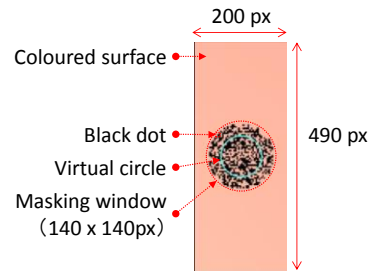


図 3 提示刺激

を示し、ドット密度は Masking window 領域を占めるドットの割合を示している。ドットサイズ、密度はいずれも独立の変数である。ドットサイズの変更例を図 4、密度の変更例を図 5 に示す。

また、仮想の円が Masking window の背後にある場合は「オクルージョンあり/なし」の 2 種類の描画方法を設定した（図 6）。オクルージョンありの場合は、Masking window の black dot の部分のみ仮想の円が見える。これは第 1 章で述べた疑似透過 [12][13] に相当し、レース状の実物体を透かして見ている状態である。

一方、オクルージョンなしの場合は、仮想の円と実物体表面の前後関係を無視し、常に円の全体が見える。これは第 1 章で述べた "Stereo-transparency" [1][12][13] に相当する（また、実利用時に、実物体の 3 次元モデルが



図 4 ドットサイズの変更例  
(左より 1/10, 1/40, 1/80)



図 5 ドット密度の変更例  
(左より 20%, 40%, 80%)

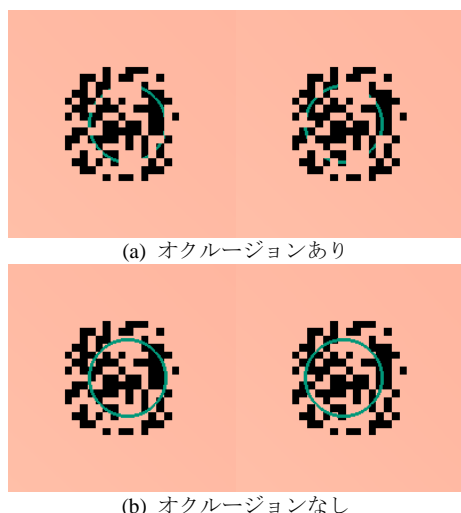


図 6 ステレオ立体視可能な環境におけるオクルージョンの例. この例では、図 1 と同様、交差法用に図を配置している.

なく、仮想物体との相対的な位置の整合性が取れない場合にも相当する). 仮想の円が Masking window の前面にある場合には、いずれのオクルージョン条件でも見え方は同じである.

### 2.3 被験者

被験者は裸眼、もしくは眼鏡によって正常な視力を持つ University of Toronto の 21 歳以上の大学院生 15 名 (男性 18 名, 女性 3 名) であった. また, 実験開始時に NVIDIA 3D stereo vision test によって, システムで立体視ができていないことを確認した. 一人あたりの実験時間は約 1 時間で, 終了後に謝金 15 カナダドルが支払われた.

## 3. 実験 1

### 3.1 目的と手順

実験 1 では, Masking window のデザインが奥行き弁別能力におよぼす影響について調査した. 具体的には恒常法 [7] を用い, Masking window のデザインが JND (Just-noticeable difference : 丁度可知差異) に影響を及ぼすかどうかを比較した.

被験者には, Masking window に対して円を前面に配置

した場合と背面に配置した場合をランダムに提示し, 円が Masking window の前面にあるか背面にあるかを被験者に回答させた. Masking window から円までの距離は前面 2 種 (+0.02, +0.01), 背面 2 種 (-0.02, -0.01) の計 4 種類とし, Masking window はドットサイズ 2 種 (1/40, 1/60) x ドット密度 2 種 (25%, 50%) x オクルージョン 2 種 (あり/なし) = 計 8 種類を用い, 各刺激は 5 回ずつ提示した. 被験者 1 人あたりの試行回数は  $4 \times 8 \times 5 = 160$  試行となる. なお, これらの値は予備実験によって決定した. 実験 1 で用いた刺激は図 7 の 2-5, 8-11 に示す.

実験では, 事前に練習フェーズを設け, すべての被験者が刺激や回答方法を理解した後に実施した. 回答時間については特に上限を定めなかったが, 妥当な時間で回答するよう指示した. 各刺激の間には黒画面を 500 ms 表示し, 前の刺激の影響を抑えた.

### 3.2 結果

結果を図 8, 図 9 に示す (図 9 は, オクルージョンありの場合について, 横軸 0 付近を拡大したものである). 縦軸は被験者が「前面」と答えた割合, 横軸が実際に提示された仮想の円の位置を示している. 前述の通り, Masking window は 0 の位置にある.

得られた回答より, 正規補間法による推定を行い, PSE (point of subjective equality : 主観的等価値) を算出した. 正しく前面/背面の判定ができていない場合は, 円の位置が 0 の時に「前面」と答えた割合が 0.5 になる (Point of objective equality (POE) : 客観的等価値) はずである.

図中に×印にて PSE を示す. オクルージョンありとなしについては, なしの方が知覚バイアスが大きく, 背面であると判定される傾向にあるのに対し, ありの方が明らかに POE と近い結果を得ている. このことから, オクルージョンありの方が確度の高い前後判定ができていると言える.

次に, ドットサイズとドット密度についてみてみると, オクルージョンの有無を問わず, ドットサイズは大より小, ドット密度は低より高の方がより確度が高い.

次に, UT (Upper threshold : 上側弁別閾) と LD (Lower

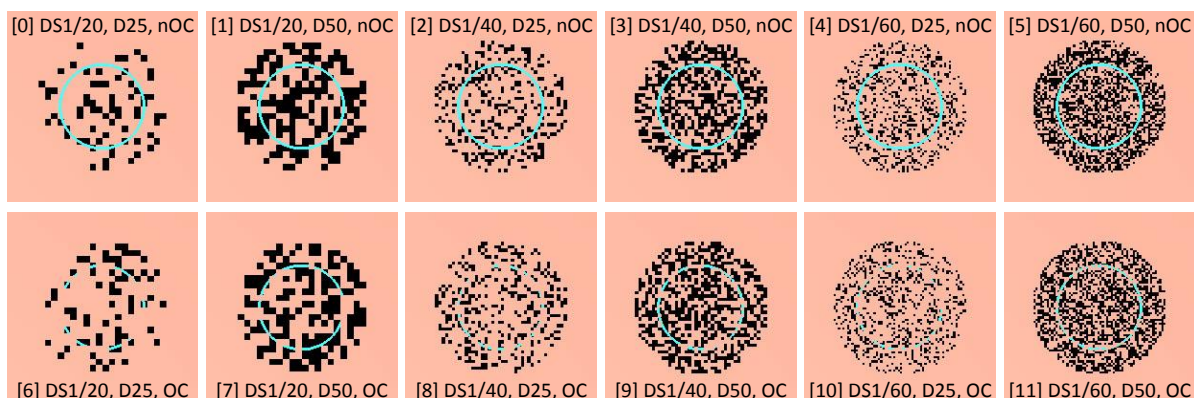
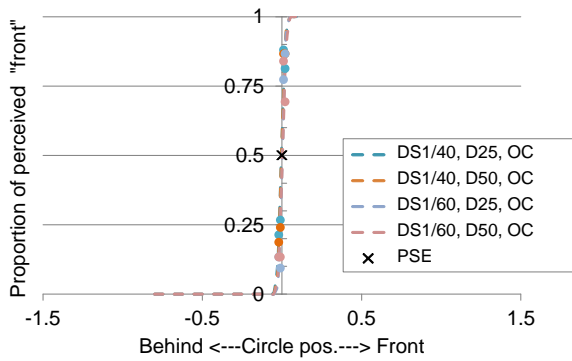
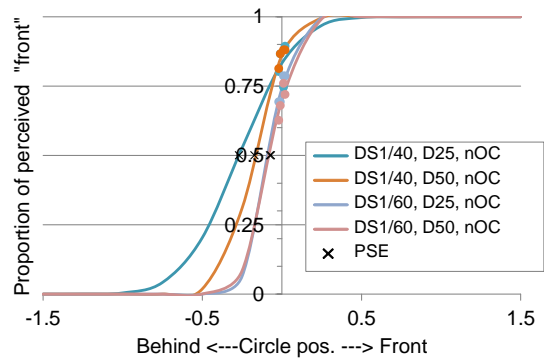


図 7 実験 1, 2 で用いた刺激 (0, 1, 6, 7 は実験 2 のみ, 他は実験 1, 2 共通)  
DS=ドットサイズ, D=ドット密度, OC/nOC=オクルージョンあり/なし





(a) オクルージョンあり



(b) オクルージョンなし

図 8 実験 1 結果

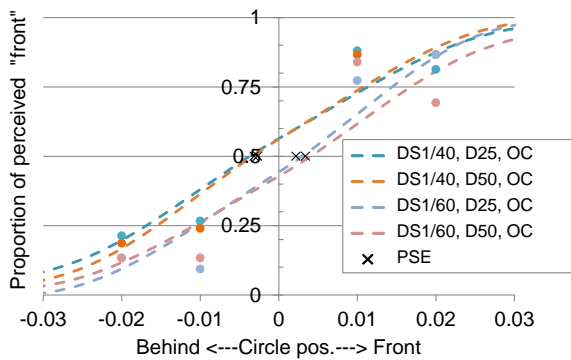


図 9 実験 1 結果のうち、オクルージョンありの結果について、横軸 0 付近を拡大したもの

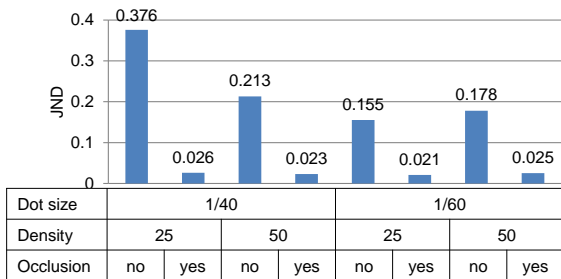


図 10 実験 1 における JND の算出結果

threshold: 下側弁別閾)を算出し、JNDを比較した(図 10)。結果より、オクルージョンありの場合にはなしの場合に比べて JND が小さく、精度良く前後判定ができてることがわかる。オクルージョンなしの場合に着目すると、ドットサイズが大きく、ドット密度が低い組み合わせが、最も JND が大きく、前後判定が困難であることがわかる。

しかしいずれの場合も、主たる要素はオクルージョンの有無である。

#### 4. 実験 2

##### 4.1 目的と手順

実験 2 では、サーストンの一対比較法 [11] を用いて Masking window のデザインが疑似透過知覚に及ぼす影響を尺度化した。この実験では、円は常に Masking window の背面、一定距離 (-0.1。この距離は予備実験によって決

定した)に配置した。被験者は左右に並べて表示された刺激対を比較し、

- (1) 仮想の円が Masking window の背面にあることが知覚しやすい刺激はどちらか
- (2) Masking window がより透明に見える刺激はどちらかの 2 項目の質問に回答する。

実験では、Masking window のデザインはドットサイズ 3 種 (1/20, 1/40, 1/60) x ドット密度 2 種 (25%, 50%) x オクルージョン 2 種 (あり/なし) = 計 12 種類を用いた。被験者は全組み合わせについて判定を行うため、1 人あたりの試行回数は  ${}_{12}C_2=66$  試行である。実験で用いた全刺激を図 7 に示す。

#### 4.2 結果

得られた回答より、(1) 仮想の円が Masking window の背面にあることの知覚しやすさ (Ease of perceive behind; EPB), (2) Masking window がより透明に見える度合い (Transparent scale; TS) を尺度化し、縦軸にとり、横軸をそれぞれドットサイズ、ドット密度、オクルージョンの有無とした場合の結果を図 11 に示す。いずれのグラフも、縦軸の値が大きいほど、各質問に対する被験者の同意が多く得られたことを意味している。

項目 (a) EPB についてはオクルージョンの有無に着目すると、明確にオクルージョンありの方が背面にあると知覚しやすいことが分かった。一方、項目 (b) TS についてはオクルージョンの有無にかかわらずドット密度が高い方がより透明であると知覚された。

これらの結果より、「背面にあるように知覚される」と「透明であると知覚される」ことは必ずしもイコールではないとわかった。例えば、ドットサイズ 1/20、ドット密度 50%、オクルージョンありの場合のように、仮想の円が背面に見えた場合でも、円の全容が把握できない場合は、Masking window 部分が透明であると知覚されにくいと言える。

#### 5. むすび

本研究では、ステレオ立体視環境において実物体に仮

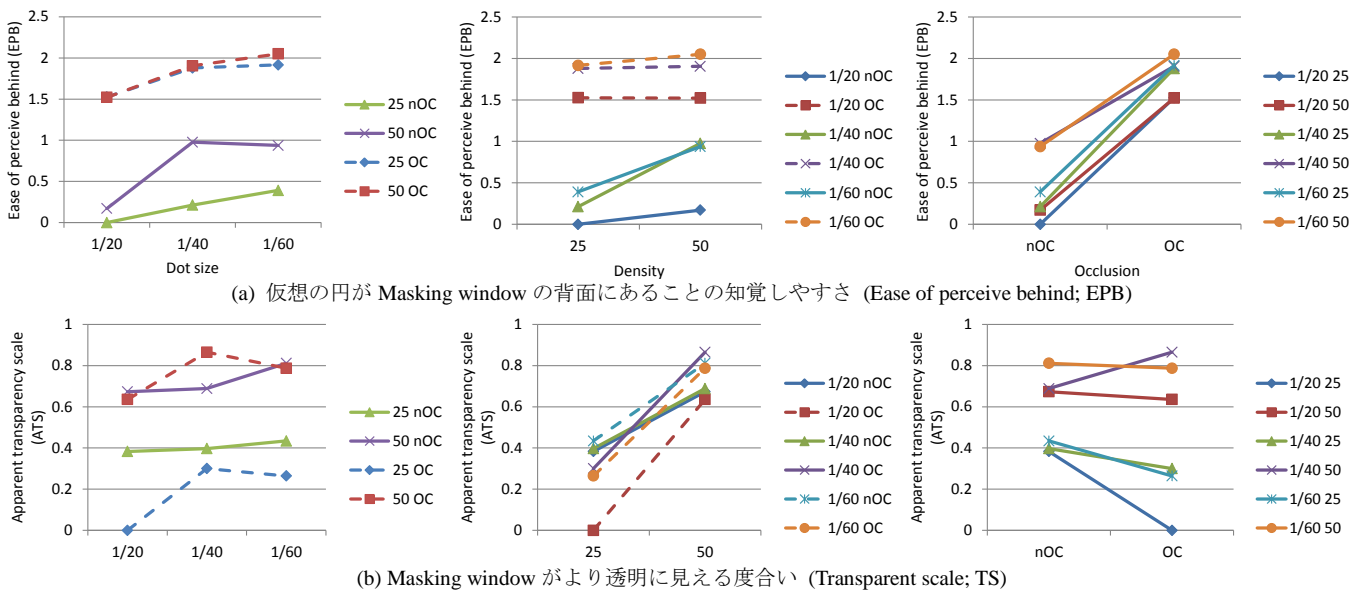


図 11 実験 2 結果

想物体を重畳描画した時に両眼視差から生じる奥行き知覚と、オクルージョンによって生じる奥行き知覚の矛盾の低減について系統的な実験を行った。具体的には、ランダムドットマスクを実物体の上に重畳描画し、そのマスク越しに背面にある仮想物体を観察することで、その奥行き知覚が容易になるというステレオ疑似透過について、ランダムドットマスクのデザインと、疑似透過知覚の関係を調査した。

実験 1 では、実物体表面に対して前面／あるいは背面に配置した仮想物体に対して、心理物理学的実験を行い、オクルージョンなしの場合は精度・確度ともに低下することを確認した。実利用の観点から述べるならば「モニタベースのステレオ AR システムでは、仮想物体が実物体の背面にあるときは実物体表面の一部のピクセルを仮想物体の上に描画する必要がある」と言える。しかしながら、これを実現するためには Kinect など、何らかの方法で実物体表面の深度情報をリアルタイムに取得する必要がある。

実験 2 では、サーストンの一対比較法を用いて、仮想物体の奥行き知覚の容易さ、および実物体表面の透明知覚の程度について評価した。実験結果は、予想されていた通り、仮想物体の奥行き知覚についてはオクルージョン手がかりの重要性を示し、また、表面の透明知覚についてはドット密度が重要であることを示した。

これらの実験結果は、ステレオ疑似透過を用いることによって、AR 環境における実物体表面の透過知覚を容易にすることができるという可能性を示唆している。

本実験における制約の一つとして、実験 2 で用いた仮想の円の位置が挙げられる。

我々は、実験 2 の実施段階では実験 1 の実験結果を保持していなかった。そのため、実験 2 では 0.1 の場所（すなわち、より実物体表面に近い場所）に仮想の円を配置

したが、実際は実験 1 で求めた通り、オクルージョンなしの場合の PSE バイアスが 0.3~0.4 であったため、オクルージョンなしの場合の EPB（背面知覚の容易さ）の判定が、被験者にとってより困難になってしまった可能性がある。よって、今後の実験ではこれについて再検討する必要があると考えられる。

その他議論すべき点として、実験において、我々は実物体の表面全体ではなく、シミュレートされた表面の一部のテクスチャを変更したに過ぎない。これについては今後検討を深めたいと考えている。

また、これに関連して、我々の実験では、便宜上、モニタベースのステレオ AR システムにおいて、シミュレートされた実物体表面を用いた。今後は、「実際の」実物体を用いた実験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] R.A. Akerstrom and J.T. Todd. The perception of stereoscopic transparency. *Perception & Psychophysics*, 44(5), 421-432, 1988.
- [2] M. Bajura, H. Fuchs, and R. Ohbuchi. Merging virtual objects with the real world: Seeing ultrasound imagery within the patient. *Computer Graphics*, 26(2), 203-210, 1992.
- [3] C. Bichlmeier, F. Wimmer, S. M. Heining and N. Navab. Contextual anatomic mimesis hybrid in-situ visualization method for improving multi-sensory depth perception in medical augmented reality. In *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed & Augmented Reality (ISMAR '07)*, 1-10, 2007.
- [4] P.J. Edwards, L.G. Johnson, D.J. Hawkes, M.R. Fenlon,

- A.J. Strong, and M.J. Gleeson. Clinical experience and perception in stereo augmented reality surgical navigation. In *Proceedings of Medical Imaging and Augmented Reality (MIAR 2004)*, 369-376, 2004.
- [5] N. Elmqvist, U. Assarsson, and P. Tsigas. Employing dynamic transparency for 3D occlusion management: Design issues and evaluation. In *Proceedings of INTERACT*, 532-545, 2007.
- [6] C. Furmanski, R. Azuma, and M. Daily. Augmented-reality visualizations guided by cognition: Perceptual heuristics for combining visible and obscured information, In *Proceedings of the 2002 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '02)*, 215-224, 2002.
- [7] G. Gescheider, *Psychophysics: The Fundamentals. 3rd Edition*. Erlbaum, 1997.
- [8] M. Lerotic, A. J. Chung, G. Mylonas, and G. Yang. pq-space based non-photorealistic rendering for augmented reality. In *Proceedings of the 10th international conference on Medical image computing and computer-assisted intervention (MICCAI'07)*, 102-109, 2007.
- [9] S. Nicolau, L. Soler, D. Mutter, and J. Marescaux. Augmented reality in laparoscopic surgical oncology. *Surgical Oncology*, No. 20, Vol. 3, 189-201, 2011.
- [10] T. Sielhorst, C. Bichlmeier, S.M. Heining, and N. Navab. Depth perception – A major issue in medical AR: Evaluation study by twenty surgeons. In *Proceedings of the 10th international conference on Medical image computing and computer-assisted intervention (MICCAI'06)*, 364-372, 2006.
- [11] L.L. Thurstone. The method of paired comparisons for social values. *Journal of Abnormal & Social Psychology*, Vol. 21, 384 - 400, 1927.
- [12] I. Tsirlin, R. Allison, and L. Wilcox. Stereoscopic transparency: Constraints on the perception of multiple surfaces. *Journal of Vision* 8(5):5, 1-10, 2008.
- [13] I. Tsirlin, L. Wilcox, and R. Allison. Perceptual artifacts in random-dot stereograms. *Perception*, 39, 349-355, 2010.