

# 3D イメージと 3D 印刷されたオブジェクトの利用が熟達者と 初心者の空間的メンタルモデル形成に及ぼす影響

## Influence of using 3D images and 3D-printed objects on the formation of spatial mental models of experts and novices

前東晃礼<sup>1\*</sup> 三輪和久<sup>1</sup> 小田昌宏<sup>1</sup> 中村嘉彦<sup>2</sup> 森建策<sup>3</sup> 伊神剛<sup>4</sup>  
Akihiro Maehigashi<sup>1</sup> Kazuhisa Miwa<sup>1</sup> Masahiro Oda<sup>1</sup>  
Yoshihiko Nakamura<sup>2</sup> Kensaku Mori<sup>3</sup> Tsuyoshi Igami<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学情報科学研究科 <sup>2</sup> 苫小牧工業高等専門学校

<sup>3</sup> 名古屋大学情報連携統括本部 <sup>4</sup> 名古屋大学医学部

<sup>1</sup> Graduate School of Information Science, Nagoya University

<sup>2</sup> National Institute of Technology, Tomakomai College

<sup>3</sup> Information and Communications, Nagoya University

<sup>4</sup> Graduate School of Medicine, Nagoya University

**Abstract:** The spatial reasoning task of this study required doctors specializing in digestive surgery to infer cross sections of a liver with a a three-dimensional (3D) image and a 3D-printed object in a situation where liver resection surgery was simulated. The task performance was compared with that of university students who conducted the same task in Maehigashi et al. (2016). The results indicated that the doctors showed the same task performance when using the 3D image and the 3D-printed object. However, the university students learned faster and inferred the inside of a liver structure more accurately with the 3D-printed object than with the 3D image, and they performed equally to the professional doctors.

## 1 はじめに

### 1.1 空間的推論と 3D 印刷オブジェクト

空間的推論は、物体の形状や構造、物体間の物理的関係を推測することである [1]。ルートを探索する、坂道の傾斜角度を推測する、そして部屋の家具の配置を考えるなど、日常のあらゆる場面で空間的推論が行われている。

空間的推論を行う際、人間は、空間的メンタルモデルを形成する。空間的メンタルモデルは、要素間の空間的関係の表象である [2]。空間的メンタルモデルを利用することにより、空間的な視点の獲得や方向付けが可能になると考えられている。

これまで、いくつかの先行研究は、外的資源の利用が、空間的メンタルモデルの形成に影響を与えることを示してきた。Tversky[3] は、ルート情報の記憶時に、外的資源として、文章よりも地図が用いられたとき、そ

の後のルート探索が正確になることを実験的に示している。また、John et al.[4] は、幾何学的構造の学習時に、外的資源として、2次元(以下、2D)より3次元(以下、3D)イメージが利用されたとき、その構造の理解が正確になることを実験的に示している。3Dイメージの利用においては、複数視点の情報の獲得、奥行情報の獲得、さらに2Dイメージでは表現されない構造の特徴を把握することが可能であるため、全体的な構造の理解が促進されたと考えられている。

近年、3Dプリンタの登場により、コンピュータグラフィックスをオブジェクトとして複製することが可能になった。3Dプリンタによるオブジェクトの作成は、これまでにない全く新しい表現手法である。現在、様々な現場で利用されているが、外的表象として、この3D印刷されたオブジェクトの利用が空間的推論に与える影響についてはあまり知られていない。

Maehigashi et al.[5] は、3D印刷されたオブジェクト利用の効果について実験的に検討を行った。その結果、人体臓器構造の学習時に、3Dイメージよりもオブジェクトが利用されたとき、その構造を学習する時間

\*連絡先: 名古屋大学情報科学研究科  
〒464-8601 名古屋市中種区不老町  
E-mail: mhigashi@cog.human.nagoya-u.ac.jp

は速く、かつその構造の理解が正確であることが示された。オブジェクト利用時には、空間情報の記憶や操作に掛かる認知的負荷や情報獲得コスト (Information accessing cost) が削減される可能性が示唆された。

また、Maehigashi et al.[6] は、エスノグラフィの手法に基づいて、実際の外科手術の現場で、3D 印刷された人体臓器のオブジェクト利用が、医師の認知的活動に与える影響について検討を行っている。その結果、人体臓器のオブジェクト利用は、医師が持つ患者の臓器構造のメンタルモデル精緻化、正確な臓器切除のシミュレーション、そして医師間のメンタルモデル共有を促進することが示された。

## 1.2 熟達化

これまでの多くの先行研究は、様々な領域の熟達者が、空間情報の知覚、記憶、操作においてチャンク方略を利用することを示してきた。Chase and Simon[7] は、ゲーム中のチェス盤面の記憶において、チェスマスターは、複数の駒の配置を1つのチャンクとして知覚、記憶することを実験的に示している。また、Busey et al.[8] は、2つの指紋が同一であるかを判別する指紋照合において、指紋鑑定士の視線を計測した。その結果、指紋鑑定士は、初学者よりも、一度に広い範囲の照合を行い、様々な特徴を持つ指紋の構造を1つのチャンクとして知覚、記憶していることが示された。Hegarty et al.[9] は、歯の構造の推測において、歯科医大生4年生は、1年生よりも正確に推測を行い、様々な歯の構造の特徴を1つのチャンクとして知覚、記憶、そして操作することを実験的に示した。

Hegarty et al.[9] は、歯科医大生4年生は、歯の解剖学的知識や手術技術を学習した経験に基づく空間的メンタルモデルを形成することを示唆している。また、知識や経験に基づく空間的メンタルモデルの形成により、チャンク方略の利用が容易になる可能性を示している。いくつかの先行研究は、このような知識や経験により形成された空間的メンタルモデルについて類似した概念を示している。Woods[10] は、放射線医師は、放射線学的特徴が統合し、組織化された内的鑄型 (mental matrix) を持つため、病的な細胞の特徴を視覚的に管理、統合することに長けていると述べている。また、Gobet and Simon[11] は、チェスマスターは、経験により獲得された盤面の典型 (template) を持ち、大きな複数のチャンクの情報入力を可能にしていることを示している。

さらに、このような議論に関連して、いくつかの研究は、熟達者の空間認識能力と空間的推論パフォーマンスの関係について検討を行っている。空間認識能力は、空間情報を内的に保持、操作する能力である [12]。Hegarty et al.[9] は、熟達者の空間認識能力が高いほど、空間的推論が正確であることを実験的に示した。そ

の一方で、Ackerman[13] は、熟達化と様々な認知的能力との関連について検討を行い、領域に特化した知識を蓄積すれば、空間認識能力の影響は減少することを実験的に示している。

本研究の目的は、3D イメージと3D 印刷されたオブジェクト利用時の熟達者と初心者による空間的推論について検討を行うことである。また、熟達度と空間認識能力との関係についても検討を行う。

## 2 実験課題

本研究では、実際の肝切除手術現場を想定した空間的推論課題を実施した。参加者は、3D イメージまたは3D 印刷されたオブジェクトが示す肝臓の内部構造を参照しながら、肝臓の切断面上に現れる血管と腫瘍の位置の推測を行った。

### 2.1 材料

材料は、Maehigashi et al.[5] と同一であった。参加者の正面には、患者が横たわる手術台を想定したメインデスクが設置され、右90度横には、器具が置かれる台を想定したサブデスクが設置された。メインデスクには、3つの箱が設置され、それぞれの箱に解答用紙と患者の肝臓を想定して作られた内部構造の見えない薄グレーの肝臓のオブジェクト (以下、ターゲット) が入れられた。サブデスクには、参加者が参照をする肝臓の3D イメージが表示されたコンピュータ、または肝臓のオブジェクトが入れられた箱が設置された。図1は、3D イメージ、オブジェクト、ターゲットを示す。



図1: (a) 3D イメージ、(b) オブジェクト、(c) ターゲット

3D イメージは、CT(Computed Tomography) による患者の臓器計測によって獲得された肝臓データに基づいて、名古屋大学情報科学研究科で開発された画像診断支援システム Pluto を使用して作成された。最も太い血管である下大静脈とそこから枝分かれする5本の血管が青色で表現され、腫瘍が白色で表現された。オブジェクトとターゲットは、3D イメージと同様の肝臓データに基づいて、3D プリンタを使用して作成された。オブジェクトは、実際の手術現場で利用されるものと同じ手法で作成された。肝臓内部の構造が可視化され、3D イメージと同様に、最も太い血管である下大静脈とそこから枝分かれする5本の血管が青色で表現さ

れ、3D イメージと同一箇所、腫瘍が白色で表現された。また、ターゲットは、3D イメージとオブジェクトと同一のデータから、3つのターゲットが作成された。ターゲットは、患者の肝臓を想定して作成された。手術中に、実際の患者の肝臓内部を視覚的に確認することはできないため、肝臓表面は薄い灰色で覆われ、ターゲットの内部構造を視覚的に確認できないように作成された。3つのターゲットのそれぞれの異なる位置に、肝臓を一周する線が描かれた。また、その線を境に分離された2つの領域を示す「A」と「B」の印がつけられた。なお、3D イメージ、オブジェクト、3つのターゲットのセットが、異なる肝臓データに基づいて各2セット作成された。

## 2.2 血管と腫瘍の位置テスト

実験課題で使用されたテストは、Maehigashi et al.[5]と同一であった。上記の材料を使用して、2種類のテストを実施した。1つ目のテストは、血管の位置テストであった。参加者は、ターゲットの線に沿って肝臓を切断した場合、その切断面上に現れる血管の位置を、解答用紙に描かれた切断面の輪郭上に示すことが求められた(図2)。

その際、最も太い血管である下大静脈を「○」、そしてそこから分岐する血管を「×」で示すことが求められた。2種類の肝臓データに基づいて作成された各3つのターゲットでは、下大静脈0本と分岐血管2本、下大静脈1本と分岐血管2本、下大静脈1本と分岐血管3本が、正解として断面上に現れた。2つ目のテストは、血管の位置テストであった。参加者は、ターゲットの線に沿って肝臓を切断した場合、腫瘍がターゲットの「A」と「B」のどちらの領域に存在することになるか解答することが求められた。



図 2: (a) 切断面の輪郭,(b) 切断面,(c) 血管の数を正確に示した参加者の解答

## 3 実験

### 3.1 方法

#### 3.1.1 参加者と要因計画

参加者は、医師免許取得後8から22年 ( $M = 10.57$ )の現役の消化器外科医22名であった。本実験は、外的

資源要因2水準(イメージ/オブジェクト)の1要因参加者内計画であった。

#### 3.1.2 手続き

まず、参加者は空間認識テストを受けた。空間認識テストは、Guay and McDaniels[14]により作成された空間認識テストであった。このテストは、24問から成るメンタルローテーションを要する課題であり、3分間でこのテストをできるだけ多く正確に行うことが求められた。

次に、練習課題を行った。イメージ条件では、参加者は、下大静脈1本と分岐血管3本の3Dイメージを使用して課題を行った。オブジェクト条件では、参加者は、同一データにより作成されたオブジェクトを使用して課題を行った。課題前の最短1分から最長3分の間に、参加者は、サブデスク上で肝臓構造を観察した。その後、課題として、1つのターゲットについて血管と腫瘍の位置テストを行った。

その後の本課題では、課題前の最短3分から最長5分の間に、参加者は、3Dイメージとオブジェクトを使用して、サブデスク上で肝臓構造を観察した。3分経過後に、肝臓構造を十分に観察できたと参加者が判断した、または5分経過後に、参加者はメインデスクに向かって、3つの箱の中の1つからターゲットと解答用紙を取り出して、血管と腫瘍の位置テストを開始した。各テストを行っている間も、参加者は、3Dイメージまたはオブジェクトを自由に参照することが可能であった。解答用紙には、血管と腫瘍の位置テストが記載されていた。1つのターゲットについて解答が終了した後は、そのターゲットと解答用紙を元の箱に戻し、別の箱に入っているターゲットと解答用紙を取り出して、同様のテストを行った。3つのターゲットについて、テストに解答して課題は終了した。

3Dイメージとオブジェクトを使用する順序は、参加者間でカウンターバランスがとられた。また、3つの箱に入っているターゲットと解答用紙のセットは、ランダムな順で配置された。また、2種類の肝臓データの一方は3Dイメージに利用され、もう一方はオブジェクトに利用された。その組み合わせについても、参加者間でカウンターバランスがとられた。各課題の間には、5分間の休憩がとられた。

参加者は、できる限り正確に血管と腫瘍の位置テストを行うように教示が行われた。また、実際の手術現場で、患者の肝臓を手術台の外へ持ち出すことは不可能であるため、本実験の課題遂行中に、参加者が、ターゲットをメインデスクの範囲外に持ち出すことは禁止された。さらに、実際の手術現場では、医師らは、3D印刷された肝臓オブジェクトを患者の肝臓の真横に置いて、肝臓内部の構造の確認を行うため[6]、オブジェ

クト条件では、オブジェクトをメインデスクに持ち入れることは許された。

### 3.2 結果

本実験の参加者は、解剖学的知識や医療知識、または医療経験を持つ現役外科医である。本研究では、この熟達者と初心者のデータの比較を行った。初心者のデータとして、解剖学的知識のない一般大学生が、Maehigashi et al. [5] において、本実験と同一の実験課題を行った際のデータが用いられた。

以下の分析では、2(参加者:外科医/大学生)×2(外的資源:イメージ/オブジェクト)の分散分析を実施した。大学生を対象にした Maehigashi et al.[5] の実験では、外的資源要因は参加者間要因であったため、本研究の分析では、2 要因参加者間分散分析を行った。

まず、学習時間について分析を行った。学習時間は、課題前に 3D イメージまたはオブジェクトを使用して、肝構造を観察した各条件における平均時間であった(図 3)。その結果、交互作用が有意であった ( $F(1, 88) = 4.75, p < .05$ )。単純主効果検定の結果、イメージ条件では、外科医は大学生よりも学習時間が有意に短かった ( $F(1, 88) = 14.84, p < .001$ )。一方、オブジェクト条件では、外科医と大学生の間に学習時間の有意差はみられなかった ( $F(1, 88) = 0.60, p = .44$ )。また、大学生条件では、イメージよりもオブジェクト利用時に学習時間が有意に短かった ( $F(1, 88) = 15.70, p < .001$ )。しかし、外科医条件では、イメージとオブジェクト利用時の学習時間に有意差はみられなかった ( $F(1, 88) = 0.78, p = .38$ )。さらに、参加者要因の主効果が有意であり、外科医は大学生よりも学習時間は短いことが示された ( $F(1, 88) = 10.67, p < .005$ )。そして、外的資源要因の主効果が有意であり、3D イメージよりもオブジェクト利用時に学習時間は短いことが示された ( $F(1, 88) = 11.74, p < .001$ )。

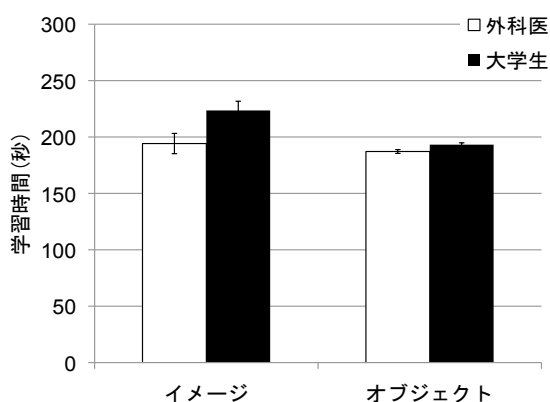


図 3: 学習時間

次に、血管の位置テストに関して、下大静脈と分岐

血管の各血管における血管数の乖離値を算出した。血管数の乖離値は、各条件で、参加者の記入した血管と正解の血管数の差分の絶対値を平均した値であった(図 4)。そのため、この値が 0 に近いほど血管数が正確に記入されたことを意味する。

下大静脈の乖離値については、全ての外科医が下大静脈の数を正確に描き、乖離値は 0 であった。一方、分岐血管の乖離値については、交互作用が有意であった ( $F(1, 88) = 5.23, p < .05$ )。単純主効果検定の結果、イメージ条件では、大学生よりも外科医の解答で乖離値は有意に低く、血管数が正確に描かれた ( $F(1, 88) = 25.45, p < .001$ )。一方、オブジェクト条件では、外科医と大学生の解答で、乖離値の有意差はみられなかった ( $F(1, 88) = 3.28, p = .07$ )。また、大学生条件では、イメージよりもオブジェクト利用時に、乖離値は有意に低く、血管数が正確に描かれた ( $F(1, 88) = 9.80, p < .01$ )。しかし、外科医条件では、イメージとオブジェクト利用時の乖離値に有意差はみられなかった ( $F(1, 88) = 0.01, p = .92$ )。さらに、参加者要因の主効果が有意であり、大学生よりも外科医の解答で乖離値は低かった ( $F(1, 88) = 23.50, p < .001$ )。そして、外的資源要因の主効果が有意であり、3D イメージよりもオブジェクト利用時に乖離値は低かった ( $F(1, 88) = 4.58, p < .05$ )。

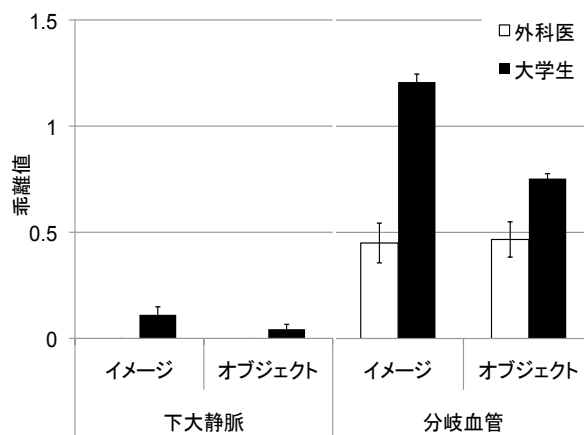


図 4: 血管の数の乖離値

また、腫瘍の位置テストについて、各テストで正しく腫瘍の位置が解答されれば、1 点が与えられた。腫瘍の位置テストの得点は、各条件における 3 つのターゲットに関するテストの合計得点の平均であった(図 5)。そのため、得点が高いほど、参加者は正確に腫瘍の位置を解答したことを意味する。

分析の結果、交互作用が有意であった ( $F(1, 88) = 4.64, p < .05$ )。イメージ条件では、大学生よりも外科医の得点が高かった ( $F(1, 88) = 5.96, p < .05$ )。一方、オブジェクト条件では、大学生と外科医の解答で得点に有意差はみられなかった ( $F(1, 88) = 0.37, p = .55$ )。また、大学生条件では、イメージよりもオブジェクト利用時に、

得点は有意に高かった ( $F(1, 88) = 24.27, p < .001$ ) . しかし, 外科医条件では, イメージとオブジェクト利用時の得点に有意差はみられなかった ( $F(1, 88) = 3.54, p = .06$ ) . さらに, 外的資源要因の主効果が有意であり, 3D イメージよりもオブジェクトを使用した際に, 得点は高かった ( $F(1, 88) = 4.64, p < .05$ ) . 参加者要因の主効果はみられなかった ( $F(1, 88) = 1.69, p = .20$ ) .

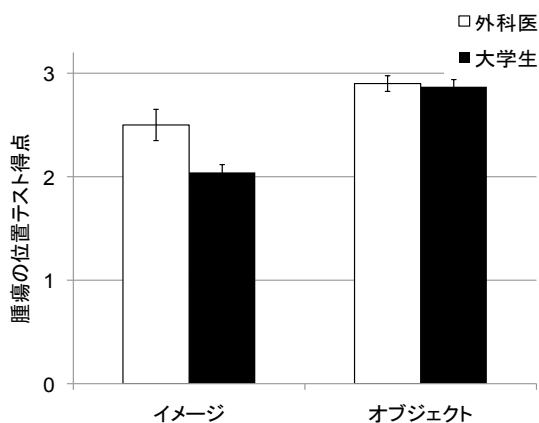


図 5: 腫瘍の位置テストの得点

さらに, イメージ条件とオブジェクト条件で, 外科医の空間認識テストの得点と課題パフォーマンス (学習時間, 分岐血管の乖離値, 腫瘍の位置テストの得点) の相関分析を行った . しかし, 空間認識テストと課題パフォーマンスとの相関はみられなかった .

最後に, 外科医と大学生の空間認識テストについて  $t$  検定を実施した . その結果, 大学生 ( $M = 8.48$ ) よりも外科医 ( $M = 10.86$ ) の方が, 空間認識テストの成績が高かった ( $t(68) = 2.20, p < .05$ ) . 外科医と大学生の空間認識能力の均一性は保たれていないが, 相関分析の結果は, 外科医の空間認識能力の優位性は, 本課題のパフォーマンスに影響を与えなかったことを示している .

## 4 考察

まず, 血管と腫瘍の位置テストの結果, 大学生は, イメージよりもオブジェクト利用時に, 血管と腫瘍の位置の推測が正確であり, 外科医と同等のパフォーマンスを示した . 先行研究は, ヴァーチャル 3D 環境よりも現実環境で, 奥行き情報は豊富であり, 人間の奥行き認識は正確であることを示している [15] . Maehigashi et al.[5] の実験に参加した大学生は, おそらく, その実験参加時に初めて肝構造の空間的メンタルモデルを形成したと考えられる . その際, オブジェクトよりも 3D イメージは, 奥行き情報が不足しているため, 大学生は, 奥行情報を補足または修正し, 一時的にそのイメージを記憶して, 内的にサイズの調整を行った上で,

イメージをターゲットに対応づける必要があったと考えられる . その一方, オブジェクトを利用する際には, 大学生は, 認識したイメージを内的に補足, 修正, またはサイズの調整を行うことなく直接的にターゲットに対応づけることが可能であったと考えられる . そのため, オブジェクト利用により, 大学生は, 認知的負荷を削減させて, 内的な操作から生じるエラーを削減し, 外科医と同等のパフォーマンスを示すことができたと考えられる .

また, 外科医は, イメージとオブジェクト利用時で, 血管と腫瘍の位置の推測の精度に違いはなかった . 先行研究は, 熟達者は, 知識や経験から形成した空間的メンタルモデルを保持していることを示唆している [9] . 本研究でも, 外科医は, 知識や経験に基づいて形成した肝構造の空間的メンタルモデルを保持していたと考えられる . その結果, 3D イメージまたはオブジェクトを利用して, 既に形成されたメンタルモデルを修正し, 奥行き情報の欠落した 3D イメージ利用時も, オブジェクト利用時と同等に正確な推測が可能であったと考えられる .

さらに, オブジェクトの利用は, 3D イメージの利用よりも情報獲得に掛かるコスト (information accessing cost) を削減させた可能性が考えられる . 情報獲得コストは, 情報を獲得する際に掛かるコストである [16] . 今回の実験における 3D イメージの利用では, マウス操作を行って情報を獲得する必要があった . その一方, オブジェクトの利用では, オブジェクトを持ち上げて物理的に回転させて情報を獲得することが可能であった . そのため, オブジェクトの利用は, 情報獲得に掛かるコストや操作ミスを軽減させることができた可能性が考えられる .

次に, 学習時間の結果, 大学生の学習時間は, イメージよりもオブジェクト利用時に短く, 外科医の学習時間と同等であった . また, 外科医の学習時間は, イメージとオブジェクト利用時で違いはなかった .

上述のように, 大学生は, オブジェクトの利用により, 認知負荷や情報獲得コストを削減させ, イメージ利用時よりも詳細にかつ迅速に肝構造を学習し, 外科医と同等のパフォーマンスを示すことができたと考えられる . また, 外科医に関しても上述のように, 知識や経験から形成した肝構造の空間的メンタルモデルを修正し, イメージ利用時も, オブジェクト利用時と同等に迅速な学習が可能であったと考えられる .

最後に, 熟達度と空間認識能力の関連について, 大学生がイメージを利用した場合, 空間認識能力と空間的推論パフォーマンスに相関関係がみられた [6] . 実際には, 空間認識能力が高い大学生ほど, 学習時間は長く, 分岐血管の乖離値は低かった . 一方, 外科医は, イメージとオブジェクトのいずれを利用した場合も, 空間認識能力と空間的推論パフォーマンスに相関関係は

みられなかった。

この結果は、空間認識能力と空間的推論パフォーマンスに相関関係がみられた Hegarty et al.[9] の結果と異なる。この結果の相違については、参加者の熟達度の違いが考えられる。Hegarty et al.[9] の実験における熟達者は歯科医大4年であった。一方、本研究の熟達者は医師免許取得後8から22年の現役医師であり、医大生よりも領域における熟達度は高かったと考えられる。本研究では、Ackerman[13] の実験と同様に、熟達者の空間認識能力が空間的推論パフォーマンスに与える影響はみられなかった。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (15H01614) の助成による。

## 参考文献

- [1] Byrne, R. M. J., Johnson-Laird, P. N.: Spatial reasoning, *Journal of Memory and Language*, Vol.28, No.5, pp.564-575 (1989)
- [2] Tversky, B.: Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models, In A. U. Frank and I. Campari (Eds.), *Spatial Information theory: A Theoretical Basis for GIS* (p.14-24). Berlin: Springer-Verlag. (1993)
- [3] Tversky, B.: Spatial mental models. In G. H. Bower (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory* (p.109-145). New York: Academic Press. (1991)
- [4] John, M. S., Cowen, M. B., Smallman, H. S., Oonk, K. M.: The use of 2D and 3D displays for shape-understanding versus relative-position tasks, *Human Factors*, Vol.43, No.1, pp.79-98 (2001)
- [5] Maehigashi, A., Miwa, K., Oda, K., Nakamura, Y., Mori, K., Igami, T.: Influence of 3D images and 3D-printed objects on spatial reasoning, *Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, pp.414-419 (2016)
- [6] Maehigashi, A., Miwa, K., Terai, H., Igami, T., Nakamura, Y., Mori, K.: Investigation on using 3D printed liver during surgery, *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, pp.1476-1481 (2015)
- [7] Chase, W., Simon, H. A.: Perception in chess. *Cognitive Science*, Vol. 4, No.1, pp.55-81 (1973)
- [8] Busey, T., Yu, C., Wyatte, D., Vanderkolk, J.: Temporal sequences quantify the contributions of individual fixations in complex perceptual matching tasks, *Cognitive Science*, Vol.37, No.4, pp.731-756 (2013)
- [9] Hegarty, M., Keehner, M., Khooshabeh, P., Montello, D. R.: How spatial abilities enhance, and are enhanced by, dental education, *Learning and Individual Differences*, Vol.19, No.1, pp.61-70 (2009)
- [10] Woods, B. P.: Visual expertise, *Radiology*, Vol.211, No.1, pp.1-3 (1999)
- [11] Gobet, F., Simon, H. A.: Expert chess memory: Revisiting the chunking hypothesis, *Memory*, Vol.6, No.3, pp.225-255 (1998)
- [12] Hegarty, M., Waller, D.: Individual differences in spatial abilities, In P. Shah and A. Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking*, (pp.121-169), New York: Cambridge University Press (2005)
- [13] Ackerman, P. L.: Determinants of individual differences during skill acquisition: Cognitive abilities and information processing, *Journal of Experimental Psychology: General*, Vol.117, No.3, pp.288-318 (1988)
- [14] Guay, R., McDaniels, E.: The Visualization of Viewpoints, *Learning and Individual Differences*, West Lafayette: The Purdue Research Foundation (1976)
- [15] Kemeny, A., Panerai, F.: Evaluating perception in driving simulation experiments, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.7, No.1, pp.31-37 (2003)
- [16] Gray, W. D., Sims, C. R., Fu, W-T., Schoelles, M. J.: The soft constraints hypothesis: A rational analysis approach to resource allocation for interactive behavior, *Psychological Review*, Vol.113, No.3, pp.461-482 (2006)