

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学者の空間的推論に与える影響

Influence of using 3D images and 3D-printed objects on spatial reasoning of experts and novices

前東晃礼¹ 三輪和久¹ 小田昌宏¹ 中村嘉彦² 森健策³ 伊神剛⁴

Akihiro Maehigashi, Kazuhisa Miwa, Masahiro Oda,
Yoshihiko Nakamura, Kensaku Mori, Tsuyoshi Igami

¹ 名古屋大学情報学研究科, ² 苦小牧工業高等専門学校創造工学科,
³ 名古屋大学情報連携統括本部, ⁴ 名古屋大学大学院腫瘍外科学

Nagoya University, Graduate School of Informatics

Tomakomai National College of Technology, Department of Engineering for Innovation

Nagoya University, Information and Communications

Nagoya University, Graduate School of Medicine

maehigashi@cog.human.nagoya-u.ac.jp

Abstract

This study focuses on the influence of a three-dimensional (3D) graphic image and a 3D-printed object on the spatial reasoning of experts and novices. The spatial reasoning task of this study required doctors specializing in digestive surgery to infer cross sections of a liver with a 3D image and a 3D-printed object. The task performance was compared with that of university students who conducted the same task in Maehigashi et al. (2016). The results are discussed in relation to previous studies.

Keywords — External resources, 3D image, 3D print, Spatial reasoning, Expert, Novice

1. はじめに

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]。ルート探索や坂道の傾斜角度の推測など、日常のあらゆる場面で空間的推論は行われている。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。

これまで、多くの先行研究が、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、ルートの再現は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、全体構造の理解は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、全体構造の理解が促進されると考えられている。

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。現在、様々な現場で、このようなオブジェクトが利用されている。しかし、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、大学生を対象にした実験を行った。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、臓器構造の学習時間は速く、かつ構造の理解は正確であることが明らかになった。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の参照が、医師の認知活動に与える影響について検討を行った。記録された発話と身体動作について分析を行った結果、オブジェクトの参照は、患者の臓器構造の空間的メンタルモデルの精緻化、正確な臓器切除のシミュレーション、そして医師間の空間的メンタルモデルの共有を促進することが示された。

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して、初学者よりも高い課題パフォーマンスを示すことを実験的に明らかにしてきた[7][8]。Hegarty et al.[8]は、熟達者は、経験や知識に基づいて形成され

た空間的メンタルモデルを保持しており、この空間的メンタルモデルを利用することにより、チャンク方略を行うことが可能になることを示唆している。いくつかの先行研究は、このような熟達者の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[9]は、放射線医師は、放射線学的特徴が統合、組織化され、検索可能である内的鋳型(mental matrix)を保持しており、病的な細胞の特徴を視覚的に管理し、統合することに長けていると述べている。また、Gobet and Simon[10]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情報の入力可能にしていることを示している。

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学者による空間的推論について検討を行うことである。

2. 実験

2.1. 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。実験課題は、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内部構造の見えない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: 3Dイメージ(左), オブジェクト(中), ターゲット(右).

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、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に、腫瘍が白色で表現された。

また、3Dイメージ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、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2セット作成された。

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を解答することが求められた。



図2: 肝臓の切断面の輪郭(左), 実際の切断面(中), 血管の数を正確に示した参加者の解答(右).

2.2. 方法

2.2.1. 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。

2.2.2. 手続き

実験の手続きは、基本的に Maehigashi et al.[5]と同一であった。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[11]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問から成る心的回転を要する課題であり、本実験では、3分間でこのテストをできるだけ多く正確に回答することが求められた。

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。参加者は、まず、最短1分から最長3分の間に、サブデスク上で3Dイメージまたはオブジェクトを使用して、肝構造の観察を行った。その後、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。

練習課題後の本課題では、参加者は、まず、最短3分から最長5分の間に、サブデスク上で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。3分経過後に、肝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つの箱の内の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、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。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。

さらに、実際の手術では、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、課題中に、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、実際の手術では、医師らは、3D印刷された肝臓のオブジェクトを患者の肝臓の真横に置いて、肝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. 結果

本実験の参加者は、解剖学や医療の知識、そして医療経験を持つ現役外科医であった。そのため、本実験のデータを熟達者のデータとして用い、また、解剖学的知識のない一般大学生が、Maehigashi et al.[5]において、本実験と同一の課題を行った際のデータを初学者のデータとして用いて、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、サブデスク上で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)。

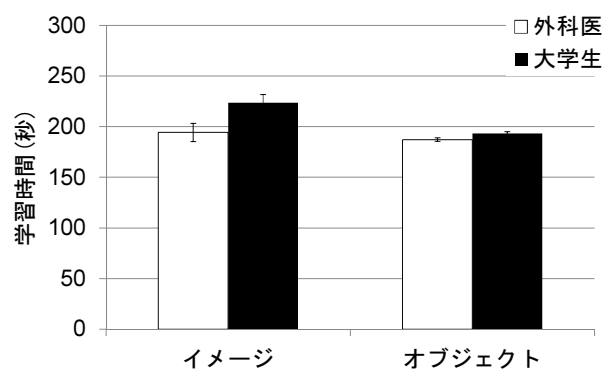


図3: 学習時間

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($F(1, 88)=11.74, p<.001$).

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($F(1, 88)=4.58, p<.05$)。

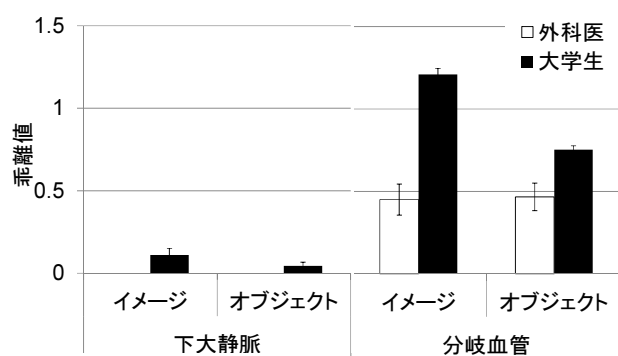


図4：血管数の乖離値

さらに、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($F(1, 88)=1.69, p=.20$)。

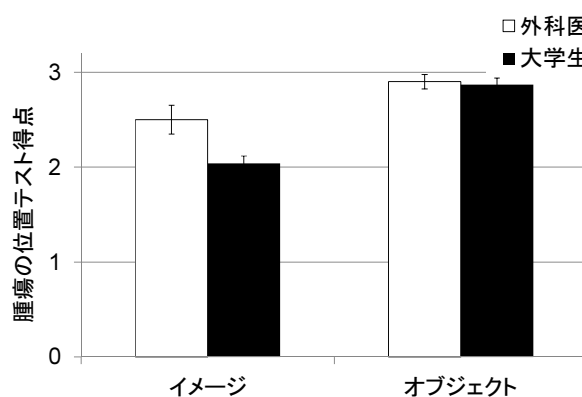


図5：腫瘍の位置テスト得点

4. 考察

まず、血管と腫瘍の位置テストの結果、大学生は、3D 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。このような結果が得られた理由として、オブジェクト利用による認知負荷の削減と身体動作の影響が考えられる。

認知負荷の削減に関して、先行研究は、ヴァーチャル環境よりも実環境で、奥行き情報は豊富であり、人間の奥行き認識は正確になることを示している[12]。本研究の実験では、3D イメージを利用した際、参加者は、イメージが示す奥行情報を、内的に補足または修正した上で、イメージの情報をターゲットに対応づける必要があったと考えられる。一方、オブジェクトを利用する際には、参加者は、オブジェクトが示す情報を、内的に補足や修正する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

の結果、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、内的操作により生じるエラーを削減したと考えられる。

次に、身体動作の影響に関して、Wohlschläger and Wohlschläger[13]は、幾何学図形の心的回転課題において、心的回転と一致しない方向につまみを回しながら解答するときよりも、一致した方向に回しながら解答するときの方が、解答時間は速いことを明らかにし、オブジェクトの内的操作に一致した身体動作が、迅速な内的操作を促すことを示した。本研究の実験では、コンピュータマウスによる3Dイメージの操作よりも、オブジェクトを持ち上げて回転させる動作の方が、内的操作との一致性は高く、その結果、空間情報の内的操作を円滑にして、内的操作のエラーを削減させた可能性が考えられる。

また、3Dイメージとオブジェクト利用時で、血管と腫瘍の位置テストにおける外科医の推測の正確さには違いはなかった。先行研究では、熟達者は、知識や経験に基づいて形成した空間的メンタルモデルを保持していることが示唆されている[8]。本研究でも、外科医は、肝構造の空間的メンタルモデルを既に保持していたと考えられる。その結果、奥行き情報の不足した3Dイメージを利用した際も、その空間的メンタルモデルを駆使して、情報の不足を補い、オブジェクト利用時と同等に正確な推測を可能にしたと考えられる。

さらに、学習時間の結果、大学生の学習時間は、3D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。上述のように、大学生は、オブジェクト利用により認知負荷を削減させ、またオブジェクト利用時の身体動作により、迅速に肝構造を学習することができたと考えられる。また、外科医の学習時間は、3Dイメージとオブジェクト利用時で違いはなかった。外科医に関しても、上述のように、知識や経験に基づいて形成した空間的メンタルモデルを駆使して、3D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。

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. (1989). Spatial

reasoning. *Journal of Memory and Language*, Vol. 28, No. 5, pp. 564-575.

- [2] Tversky, B. (1993). 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.
- [3] Tversky, B. (1991). 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.
- [4] John, M. S., Cowen, M. B., Smallman, H. S., & Oonk, K. M. (2001). The use of 2D and 3D displays for shape-understanding versus relative-position tasks. *Human Factors*, Vol. 43, No. 1, pp. 79-98.
- [5] Machigashi, A., Miwa, K., Oda, K., Nakamura, Y., Mori, K., & Igami, T. (2016). 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.
- [6] Machigashi, A., Miwa, K., Terai, H., Igami, T., Nakamura, Y., & Mori, K. (2015). Investigation on using 3D printed liver during surgery. *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, pp. 1476-1481.
- [7] Chase, W., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Science*, Vol. 4, No. 1, pp. 55-81.
- [8] Hegarty, M., Keehner, M., Khooshabeh, P., & Montello, D. R. (2009). How spatial abilities enhance, and are enhanced by, dental education. *Learning and Individual Differences*, Vol. 19, No. 1, pp. 61-70.
- [9] Woods, B. P. (1999). Visual expertise. *Radiology*, Vol. 211, No. 1, pp. 1-3.
- [10] Gobet, F., & Simon, H. A. (1998). Expert chess memory: Revisiting the chunking hypothesis. *Memory*, Vol. 6, No. 3, pp. 225-255.
- [11] Guay, R., & McDaniels, E. (1976). *The Visualization of Viewpoints*, Learning and Individual Differences, West Lafayette: The Purdue Research Foundation.
- [12] Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 31-37.
- [13] Wohlschläger, A., & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, Vol. 24, No. 2, pp. 397-412.