

3D イメージと 3D 印刷されたオブジェクトの利用が 肝構造のメンタルモデル形成に与える影響

Influences of 3D images and 3D-printed objects on mental model construction of liver structure

前東晃礼^{1*} 三輪和久¹ 小田昌宏¹ 中村嘉彦² 森建策³ 伊神剛⁴
Akihiro Maehigashi¹ Kazuhisa Miwa¹ Masahiro Oda¹
Yoshihiko Nakamura² Kensaku Mori³ Tsuyoshi Igami⁴

¹ 名古屋大学情報科学研究科 ² 苫小牧工業高等専門学校

³ 名古屋大学情報連携統括本部 ⁴ 名古屋大学医学部

¹ Graduate School of Information Science, Nagoya University

² National Institute of Technology, Tomakomai College

³ Information and Communications, Nagoya University

⁴ Graduate School of Medicine, Nagoya University

Abstract: In this study, we experimentally investigated the influence of a three-dimensional (3D) graphic image and a 3D-printed object on a spatial reasoning task in a situation where liver resection surgery was presupposed. The results of the study indicated that using a 3D-printed object produced more accurate and faster mental model construction of a liver structure than a 3D image. Using a 3D-printed object was assumed to reduce cognitive load and information accessing cost more than using a 3D image.

1 はじめに

物体の形状や構造、または物体間の位置関係の推測は空間的推論とよばれる [1]。ルート探索、坂道の傾斜角の推測、部屋の家具の配置を考えるなど、日常生活のあらゆる場面で空間的推論が行われている。

空間的推論には、多くの場合、図表やグラフなどの外的表象が利用される [2]。空間認識に関する研究では、同一情報を異なる外的表象で示すことにより、人間が行う空間的推論が変化することが示されている。先行研究では、同一情報を 2次元 (2D) と 3次元 (3D) イメージで示す効果について実験的な比較が行なわれている [3]。その結果、3D イメージの利用は、物体の全体的な構造の理解に有効であることが明らかにされた。一方で、物体間の位置関係の理解については、2D イメージの利用が有効であることが示された。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ると考えられている。一方、2D イメージ

の利用においては、単一視点の情報に集中することができるため、特定の情報の理解に有効であると考えられている。さらに、いくつかの研究は、空間認識能力の高い人においてのみ、3D イメージを利用する効果が現れることを実験的に示している e.g. [4]。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 [5]。空間認識能力の高い人は、3D イメージの複雑な情報を上手く活用することができるため、その情報を利用する効果が顕著に現れると考えられている [4]。

近年、3D プリンタの登場により、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。教育、産業、医療などの様々な現場で、3D 印刷されたオブジェクトが利用されはじめているが、外的表象としての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検討が行われていない。先行研究では、肝切除手術現場において、3D 印刷された肝臓のオブジェクトがどのように利用されているかエスノグラフィの手法に基づく検討が行なわれている [6]。その結果、オブジェクトの利用は、医師らが内的に形成する肝構造のメンタルモデルの精緻化を促すことが示された。さらにこの先行研究では、オブジェクトの利用は、3D イメージの利用よりも、医師らのメンタルモデルの精緻

*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

化を促進する可能性が示唆されている。

本研究の目的は、肝切除手術現場を想定した空間的推論課題を用いて、3D イメージとオブジェクトの利用がメンタルモデルの形成に与える影響について実験的に検討を行うことである。

2 実験

本研究では、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構造を記憶して、または参照しながら、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 方法

2.1.1 参加者

参加者は、名古屋大学の大学生 48 名であった。

2.1.2 要因計画

本実験は、外的表象要因 2 水準 (イメージ/オブジェクト) と課題要因 2 水準 (記憶/参照) のそれぞれ参加者間と参加者内の混合要因計画であった。

2.1.3 材料

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、各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い灰色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、参加者が記憶または参照をする肝臓の 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 (図 1a)。最も太い血管である下大静脈とそこから分岐する 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 プリンタにより作成された。具体的には、厚さ 0.02mm のアクリル樹脂のユニットを約 4000 層重ね、その後、余分な樹脂を溶かして表面を磨いて完成させた。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 (図 1b)。肝構造が可視化され、3D イメージと同様に、下大静脈とそこから分岐する 5 本の血管が青色、腫瘍が白色で表現された。また、ターゲットは、患者の肝臓を想定して作成された (図 1c)。3D イメージとオブジェクトと同一の肝臓データから 3 つのターゲットが作成された。実際の手術中には、患者の肝臓内部を視覚的に確認することは不可能であるため、ターゲットの表面は薄い灰色で覆われた。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。さらに、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。

2.1.4 実験課題

上記の材料を使用して、2 つ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に、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)。



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

その際、最も太い血管である下大静脈を「○」、分岐する血管を「×」で示すことが求められた。なお、正解として、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 本が各ターゲットの断面上に現れるように切断線が描かれた。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に、腫瘍がターゲットの「A」と「B」のどちらの領域に存在するかを解答することが求められた。

2.1.5 手続き

24 名の参加者は 3D イメージを利用するイメージ条件、残りの参加者はオブジェクトを利用するオブジェクト条件にランダムに割り振られた。参加者は、実験課題を行う前に、解剖学の知識テストと空間認識テス

トを受けた。解剖学の知識テストは、5問の質問から成り、肝臓の部位や血管の名称を解答するテストであった。空間認識テストは、Guay and McDaniels [7]により作成された24問から成るメンタルローテーションを要するテストであった。参加者は、3分間でできるだけ多くの問に正解することが求められた。

次に、実験課題の練習を行った。全ての参加者が記憶課題のあとに参照課題を行った。課題の練習では、下大静脈1本と分岐血管3本の3Dイメージまたはオブジェクトが使用された。課題前に最短1分から最長3分の学習時間が設けられ、その間に、サブデスク上で、参加者は記憶課題では肝構造を記憶し、参照課題では肝構造を観察した。その後、課題としてメインデスク上で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。

その後の本実験の記憶課題では、課題前の最短3分から最長5分の学習時間の間に、参加者はサブデスク上で3Dイメージまたはオブジェクトを使用して肝構造を記憶した。3分経過後に、肝構造を記憶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。その際、イメージ条件ではコンピュータの画面が消され、オブジェクト条件ではオブジェクトがサブデスク上の箱の中に入れられた。1つのターゲットについて解答が終了した後、参加者は、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記憶課題は終了した。本実験の参照課題は、基本的に記憶課題と同じ流れで実施された。参照課題では、記憶課題とは別の肝臓データに基づいて作成された3Dイメージまたはオブジェクト、そしてターゲットが使用された。参照課題では、参加者は、課題前の最短3分から最長5分の学習時間の間に、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、課題遂行の間も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。

課題を行う順序は、参加者間でカウンターバランスがとられた。また、課題の種類と2種類の肝臓データ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。さらに、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。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ことが求められた。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、実験中に、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 結果

解剖学の知識テストに関して、問題に正答した参加者はいなかった。また、空間認識テストの正答数に関して、イメージ条件 ($M = 9.08$) とオブジェクト条件 ($M = 7.88$) で有意な差はみられなかった ($t(46) = 1.01, p = .32$)。これらの結果から、解剖学の知識と空間認識能力に関して条件間の均一性が確認された。

次に、学習時間について、2(外的表象：イメージ/オブジェクト) × 2(課題：記憶/参照)の分散分析を実施した。学習時間は、各条件における課題前に参加者が3Dイメージまたはオブジェクトを記憶または観察した時間の平均であった(図3)。その結果、交互作用はみられなかった ($F(1, 46) = 0.14, p = .71$)。外的表象要因の主効果がみられ、イメージ条件よりもオブジェクト条件で有意に学習時間は短いことが示された ($F(1, 46) = 7.72, p < .01$)。また、課題要因の主効果がみられ、記憶条件よりも参照条件で有意に学習時間は短いことが示された ($F(1, 46) = 23.35, p < .001$)。

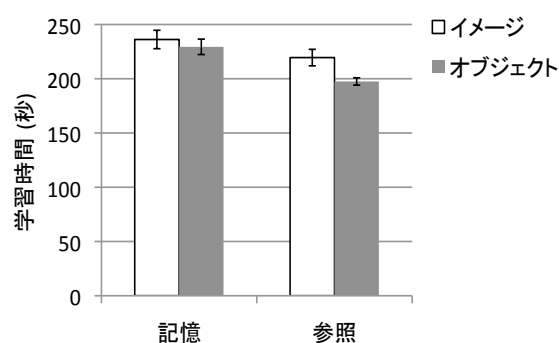


図3: 学習時間

また、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の数の乖離値を算出した。血管の数の乖離値は、各条件で、参加者の記入した血管と正解の血管の数の差分の絶対値を平均した値であった。そのため、この値が0に近いほど血管の数が正確に記入されたことを意味する。下大静脈と分岐血管のそれぞれの血管の数の乖離値について2(外的表象：イメージ/オブジェクト) × 2(課題：記憶/参照)の分散分析を実施した。その結果、下大静脈の数の乖離値について交互作用はみられなかった ($F(1, 46) = 1.73, p = .19$)。また、外的表象要因の主効果はみられなかった ($F(1, 46) = 0.50, p = .48$)。一方、課題要因の主効果に有意傾向がみられ、記憶条件よりも参照条件で乖離値が低く、正確に血管の数が記入される傾向が示された ($F(1, 46) = 3.08, p = .09$)。次に、分岐血管の数の乖離

値の結果を図4に示す。分析の結果、交互作用はみられなかった ($F(1, 46) = 0.09, p = .77$)。また、外的表象要因に主効果がみられ、イメージ条件よりもオブジェクト条件で乖離値が有意に低く、正確に血管の数が記入されたことが示された ($F(1, 46) = 8.30, p < .001$)。しかし、課題要因の主効果はみられなかった ($F(1, 46) = 2.19, p = .15$)。

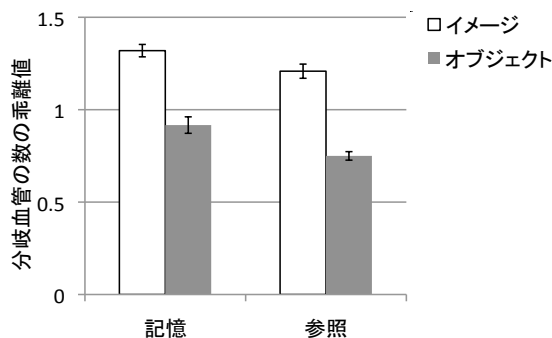


図4: 分岐血管の数の乖離値

さらに、腫瘍の位置テストの得点について、2(外的表象:イメージ/オブジェクト) × 2(課題:記憶/参照)の分散分析を実施した。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 ($F(1, 46) = 18.98, p < .001$)。交互作用について単純主効果の検定を行った結果、記憶条件では外的表象要因の単純主効果に有意傾向がみられ ($F(1, 92) = 3.38, p = .07$)、参照条件では有意差がみられ ($F(1, 92) = 21.15, p < .001$)、イメージ条件よりもオブジェクト条件で有意に得点が高く、正確に腫瘍の位置が解答されたことが示された。なお、外的表象要因の主効果はみられたが ($4F(1, 46) = 18.98, p < .001$)、課題要因の主効果はみられなかった ($F(1, 46) = 0.12, p = .73$)。

最後に、各条件における空間認識テストの得点と課

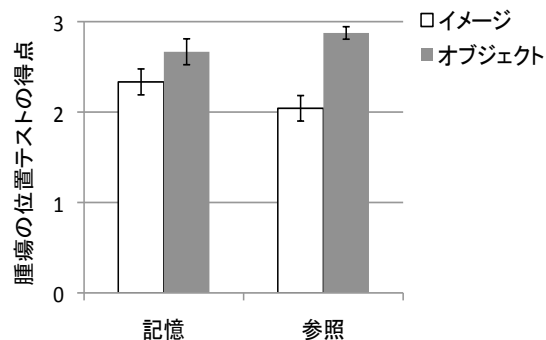


図5: 腫瘍の位置テストの得点

題パフォーマンス(学習時間、血管の数の乖離値、腫瘍の位置テストの得点)の相関分析を行った(表1)。その結果、記憶条件におけるイメージ条件で、空間認識テストの得点と学習時間に正の相関が確認され、分岐血管の数の乖離値に負の相関が確認された。これらの結果は、記憶課題で3Dイメージを利用した際に、空間認識能力の高い参加者ほど、学習時間が長く、分岐血管の数を正確に記入したことを示している。

4 考察

血管と腫瘍の位置テストの結果、3Dイメージよりもオブジェクトを利用した際に肝構造の理解は促進された。つまり、オブジェクトの利用は、3Dイメージの利用よりも、メンタルモデルの精緻化を促進させたことが明らかとなった。

オブジェクトの利用は、3Dイメージの利用よりも認知的負荷を削減させた可能性が考えられる。先行研究は、ヴァーチャル3D環境よりも現実世界で奥行き情報が豊富であるため、人間の奥行き認識は正確であることを示している[8]。このことは、3Dイメージにおいても奥行き情報が不足していることを示している。そのため、3Dイメージを利用する際に、参加者は、奥行き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、内的に大きさの調整を行った上で、そのイメー

表1: 各条件における空間認識テストの得点と課題パフォーマンス(学習時間、血管の数の乖離値、腫瘍の位置テストの得点)の相関関係。値は相関係数(r)を示す。

| | | 学習時間 | 血管の数の乖離値 | | 腫瘍の位置 テストの得点 |
|--------|----|-------|----------|-------|-----------------|
| | | | 下大静脈 | 分岐血管 | |
| イメージ | 記憶 | .45** | -.14 | -.44* | .30 |
| | 参照 | -.22 | -.19 | -.13 | -.19 |
| オブジェクト | 記憶 | .08 | -.03 | -.04 | -.30 |
| | 参照 | .17 | .21 | -.05 | .18 |

* $p < .05$, ** $p < .01$

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には、参加者は、認識をしたイメージを内的に補足、修正、または大きさの調整を行うことなく直接的にイメージを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、オブジェクトの利用により、参加者は、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することができたと考えられる。

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 [9]。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。

学習時間に関する分析の結果、3D イメージよりもオブジェクトを利用した際に肝構造を学習する時間は短かった。上記のように、オブジェクトの利用により、認知的負荷や情報獲得に掛かるコストが削減されたことにより、迅速なメンタルモデルの形成が促進され、学習時間が短くなったと考えられる。

さらに、記憶課題で 3D イメージ条件を利用した場合にのみ、空間認識テストの得点と学習時間または分岐血管の数の乖離値との相関関係が確認された。空間的認識能力の高い参加者は、複雑な空間情報を正確に保持して操作することが可能であるため、肝構造の学習に十分な時間を掛けてメンタルモデルを精緻化させ、課題に正確に解答することができたと考えられる。特に記憶課題では、参加者は、内的なイメージの記憶または操作に基づいて課題を遂行する必要があった。また、今回の分岐血管に関する血管の位置テストは最も難易度の高い課題であった。そのため、記憶課題の分岐血管に関するテストで空間的認識能力の影響が顕著に現れたと考えられる。さらに、オブジェクトの利用は、空間認識能力の影響を相殺する可能性が考えられる。特に、空間的認識能力の低い参加者のパフォーマンスを向上させる可能性が考えられる。しかし、今回の実験では、このような仮説を検証するためのデータは得られなかった。

本研究では、実際の肝切除手術現場を想定して、3D イメージとオブジェクトの利用がメンタルモデルの形成に与える影響について実験的に検討を行った。その結果、オブジェクトの利用は、3D イメージよりも、迅速かつ正確なメンタルモデルの形成を促進させ、正確な空間的推論を促すことが明らかとなった。

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] Hegarty, M.: The cognitive science of visual-spatial displays: Implications for design, *Topics in Cognitive Science*, Vol.3, No.3, pp.446-474 (2011)
- [3] 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)
- [4] Nguyen, N., Nelson, A. J., Wilson, T. D.: Computer visualizations: Factors that influence spatial anatomy comprehension, *Anatomical Sciences Education*, Vol.5, No.2, pp.98-108 (2011)
- [5] 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)
- [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] Guay, R., McDaniels, E.: The Visualization of Viewpoints, *Learning and Individual Differences*, West Lafayette: The Purdue Research Foundation (1976)
- [8] Kemeny, A., Panerai, F.: Evaluating perception in driving simulation experiments, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.7, No.1, pp.31-37 (2003)
- [9] 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)