

■S3 群 (脳・知能・人間) - 2 編 (感覚・知覚・認知の基礎)**11 章 空間のイメージ**

(執筆著者: 吉田千里) [2008 年 7 月 受領]

■概要■

空間のイメージとは、異なる視点からの見え方、異なる位置にいる自己と対象物との位置関係を想起して再構成し、様々な運動に利用する空間表象のことで、「自分の行動空間についての知識」ともいえる。想起され再構成される点が重要で、空間の記憶イメージを異なる視点からのイメージに変換する際に、オンラインで得られる知覚情報により表現が修正されないプロセスを経る点が特徴であろう。ここで考えたい問題が 2 点ある。まず、空間の記憶イメージはそもそもどのようなになっているのか。物体の位置の記憶は知覚像のとおりなのか、あるいは独特のゆがみ方をしているのか。そして、異なる位置で見る空間としてどのように変換(更新)されるのか。この問題にアプローチするために、本章では、人間の行動空間の構造、空間表現の特性と脳内基盤、空間の記憶イメージの変換過程について述べる。

【本章の構成】

まず、空間の行動学的分類(11-1 節)で、行動空間が複数の領域から構成されることを示す神経心理学的知見を紹介する。次に空間表現とその変換(11-2 節)で、空間の表現形式とそれらの機能を示唆する心理学的知見や、空間表現の統合過程に関する神経科学的知見について述べる。最後に、広域空間の記憶がどのように保持され、また身体の自由な移動に従ってどのように変換されるのかを検討した多くの心理学的知見について、空間イメージの特性とその更新(11-2 節)で紹介する。

■S3 群 - 2 編 - 11 章

11-1 空間の行動学的分類

(執筆著者：吉田千里) [2008 年 7 月 受領]

空間は一様に広がるものとして見られているが、様々な行動学的事実から、観察者からの距離に応じて異なる空間として符号化されていることが分かってきた。研究者によって分類されるクラスは異なるが、それらを総合すると身体外空間には、体表面にごく近い空間 (percutaneous space) と、これよりもやや遠い空間で手の届く範囲の空間 (reaching space)、更にそれよりも遠い空間 (far space) の少なくとも 3 種類があることが示されている¹⁾。Brain²⁾ は、人間の脳損傷患者に対する神経心理学的な検査の結果から、認知する空間の特性に少なくとも 2 種類あることを示した。頭頂葉上部に障害のある患者は、手の届かないところにある対象までの距離が判断できなかった。一方側頭葉後部に障害のある患者は、手の届く範囲にある対象までの距離を判断できなかった。手の届かない距離は walking distance とも呼ばれる。半側空間無視の患者の研究では、reaching space にある対象の左側が選択的に無視される例³⁾と、far space にある対象の左側が選択的に無視される例⁴⁾がそれぞれ示された。更に、reaching space 内空間と walking distance 内空間の符号化はそれぞれ、異なる神経基盤がはたしていることも示唆されている^{5,6)}。遠い空間は眼球運動のための空間として機能し、その符号化には主として 7a 野、頭頂間溝領域外側部、及び運動前野背側部とを結ぶ神経基盤が関与する。一方、近い空間は手、腕、顔、口の運動などの体性感覚的運動のための空間で、その符号化には 7b 野、頭頂間溝領域前部、及び運動前野腹側部を結ぶ神経基盤が関与する。

異なる領域に分かれる空間が一様な空間として認知されるためには、それぞれ別の神経基盤で符号化された空間を統合する必要がある。この問題に関して Iabocconi ら⁷⁾は PET による脳イメージングを通して、眼球運動空間の符号化と体性運動空間との符号化の結合を担う脳領域を調べた。その結果、右中心前回で強い活動が見られ、眼球運動空間の符号化と体性運動空間の符号化に関与すると結論づけられた。特にこの周辺領域の、右の頭頂葉後部及び下部領域では、視空間的な記憶情報が体性空間的に符号化されると考えられた⁸⁾。

■S3 群 - 2 編 - 11 章

11-2 空間表現とその変換

(執筆著：吉田千里) [2008年7月受領]

11-2-1 身体中心座標系

空間や物体の視覚的空間情報に基づいて身体の運動を遂行するとき、観察者の視点にかかわらず、空間や物体の構造を認識することが重要である。しかし、身体を通して運動するためには、空間や物体と自己の身体との空間関係を、身体を基準として表現すること、すなわち身体中心座標系による空間表現の形成と利用が不可欠である。実際の身体運動にはどのような座標系が利用されているのか。

近い空間を符号化するための身体中心座標系は、上肢による運動課題を通して詳しく調べられている。そして運動の種類と利用可能な手がかりの種類によって様々あることが分かっている。基本的手法は、手の届く距離のある場所にターゲットを短時間だけ提示し、目を閉じるか暗転させた後で **reaching** または **ポインティング** する。目を閉じる、あるいは暗転させるという操作は、ターゲットの位置を示す視覚手がかりを排除して、自己の身体感覚手がかりのみに基づいて位置を想起させるためである。このとき、定位エラーが生ずるが、ターゲット位置と運動にかかわった身体部位との位置関係、定位エラーの方向と大きさから、運動に利用された身体座標系の中心を特定することができる。身体を基準とした位置手がかりのみを利用して **ポインティング** すると、運動に関わった身体部位の初期位置に向かって偏るエラー (**undershoot** エラー) が生ずる。この傾向は **reaching space** 内での身体中心的位置表現のみに基づく **ポインティング** 動作の基本特性と考えられている。こうした手法に基づいて多くの研究から、眼中心座標系、頭部中心座標系、手中心座標系、肩中心座標系、胴体中心座標系、あるいは眼中心座標系と手中心座標系の組み合わせなど、様々な身体座標系で対象の位置情報が表現されることが分かっている⁹⁻¹⁶⁾。

Soechting ら⁹⁾は、**reaching space** 内に三次元的に配置されたターゲットに対する暗所下での **ポインティング** 課題から、**ポインティング** エラーは肩中心の球面座標系で表現したターゲット位置によって記述できることを示した。そして **ポインティング** エラーは、ターゲット位置に関する視覚表象を運動指令に変換する過程で線形変換が行われているために生ずると考えられたが、実際のメカニズムはまだ明らかでない。

11-2-2 環境中心座標系

日常的な **ポインティング** 場面では、ターゲット物体の周囲に様々な対象を観察する。これらの対象も、ターゲット物体の位置を相対的に示す重要な手がかりとして利用される。人間の空間認知においてもこのような、環境内の対象物を基準とした空間表現系が機能しており、環境中心座標系という。視覚的に知覚する物体以外には重力も、重要な環境中心座標系である。また視点の移動の影響を受けない空間表現でもあり、物体の内部構造を表現して三次元物体認識を可能にする物体中心座標系¹⁷⁾もこのなかに含まれる。

視空間行動に対する環境座標系表現のはたらきは、運動課題を通して環境座標系の原点を直接測定することは不可能であること、また近い空間にある物体への運動には物体に触れた感覚 (体性感覚) で位置を把握することができることから、見えにくい側面である。しかし、

ターゲット以外の対象によって視野が構成されることでターゲットの環境中心的位置表現が得られて、身体中心的位置表現と統合的に利用することで、より正確なポインティングが導かれることが分かっている。記憶したターゲットに対して明所でポインティングする課題を用いた研究では、ポインティングの正確さが対象の環境中心的な基準（例えば対象の提示領域の端）からの距離に依存することが明らかにされた^{18,19}。Conti と Beaubaton²⁰ は reaching distance でのポインティング動作について、ターゲットの周囲に空間情報がある場合とない場合とでターゲットへのポインティングの正確さを比較した。格子状のパターンのなかにターゲットを提示してポインティングを行うと、格子状のパターンを提示せずに完全暗所下でターゲットを提示してポインティングを行うときよりも正確にポインティングされた。精度がよい空間運動のためには、環境座標系による空間表現が欠かせないことが分かる。

11-2-3 空間表現の統合

(1) 座標系表現の機能的独立性

異なる座標系による空間表現は互いにどのような関係にあるのか。Woodin と Allport¹⁵)は、身体中心的位置表現と環境中心的位置表現を操作的に定義することで、異なる座標系による位置表現の機能を行動上分離できることを示した。目を閉じた状態で提示された聴覚ターゲットの方向を記憶し、身体を別の方向に回転させて、一定の遅延時間の後想起してポインティングで再生する。このとき、遅延時間中にはあらかじめ学習したディストラクタの位置をポインティングする干渉課題を挿入される。ポインティングする対象（再生課題ではターゲット、干渉課題ではディストラクタ）の位置は、身体に対して相対的に同じ位置を身体中心的位置とし、部屋に対して相対的に同じ位置を環境中心的位置として操作上、定義された。すると、ターゲット位置の記憶は、再生課題と干渉課題でポインティングする対象の位置が同じ基準で決められるときに選択的に干渉を受けることが分かった。すなわち、ターゲットの身体中心的位置に関する記憶は、ディストラクタの身体中心的位置の記憶によってのみ干渉を受けた。またターゲットの環境中心的位置に関する記憶は、ディストラクタの環境中心的位置の記憶によってのみ干渉を受けた。この結果は reaching distance でも walking distance でも同様に示された。これらの結果は、reaching distance でも walking distance でも身体中心的位置表現と環境中心的位置表現は機能的に独立であることを意味している。

(2) Zipser & Andersen の座標変換モデル

身体座標系による空間表現と環境座標系による空間表現が互いに機能的に独立であるにもかかわらず、人間は、一様に広がる、まとまった空間を認識し、イメージし、操作することができる。つまり、機能的に独立な空間表現が統合されて、空間のイメージの基礎がつくられていると考えねばならない。ではどのように統合されているのか。この点に関して、多くの神経生理学的事実、更にシミュレーション研究から、異なる座標系による空間表現が頭頂葉で統合され、運動の計画に利用可能な空間表現への変換が実現されることが明らかになっている。Andersen ら²¹)は、サルが同じ網膜位置にあるターゲットへのサックード課題を遂行している間の頭頂葉のニューロンの活動を調べた。このとき、頭部を固定したまま注視点の位置を変化させると、7a 野と LIP にある多くのニューロンでその受容野の感度が変化することを発見した。彼らはこの変調を眼球位置のゲインフィールドとして記述した。すなわち、7a 野と LIP のニューロンは頭部に対する眼球位置のゲインフィールドがある受容野をもち、

各ニューロンは頭部に対して特定の位置に眼球が向いているとき、最も強く活動する。Zipser と Andersen²²⁾はニューラルネットワークモデルを用いてこの頭頂葉のニューロンの活動のシミュレーションを行い、座標変換における頭頂葉のニューロンの機能を検討した。彼らは入力層-中間層-出力層の3層からなるネットワークに、網膜位置信号と頭部に対する眼球位置信号を入力として、頭部中心座標系による位置表現を出力するように、バックプロパゲーションによって学習させた。このとき中間層では入力信号の加重和が求められた。その結果、中間層のユニットが Andersen ら²¹⁾が報告した頭頂葉のニューロンと同様の活動を示し、眼球位置によって変調される特性が再現された。このことは、頭頂葉のニューロンでは網膜位置信号と眼球位置信号を入力信号とし、これらの加重和の計算を行うことで、異なる種類の位置信号が統合され、頭部中心座標系での空間表現へと変換されることを示す。またこれらの頭頂葉ニューロンは、眼球位置または頭部位置のいずれが変化したことによる視線方向の変化であるかにかかわらず、身体に対する視線方向のゲインフィールドがある受容野をもつものが多いことも分かっている²³⁾。このことから 7a 野及び LIP は網膜位置信号、眼球位置信号、頭部位置信号を結合して、身体中心座標系による空間表現に変換する機能を果たしていることが分かる。以上のことから、座標変換には異なる種類の入力信号の統合過程のはたらきが重要であること、そして異なる座標系による空間表現の統合のための基本的な計算プロセスとして入力される空間表現の加重和を求めるプロセスが機能することが示唆される。その後の研究で、サルの前頭葉のニューロンにはターゲット位置を身体中心座標系で符号化するものと環境中心座標系で符号化するものがあり、前者のタイプのニューロンは主として LIP に、後者は主として 7a 野に存在することが詳細に報告されている²⁴⁾。

■S3 群 - 2 編 - 11 章

11-3 空間イメージの特性とその更新

(執筆者：吉田千里) [2008年7月 受領]

11-3-1 遠い空間の記憶イメージ

遠い空間は、指差しや共同注意に見られるポインティング、また広域空間を移動するナビゲーションなど、特に日常的な空間行動の作業空間という性格があり、眼球運動による空間観察だけでなく、よりダイナミックな目標指向型運動が展開される。こうした運動でももちろん、身体座標系による空間表現が欠かせない。しかし、空間記憶として保持され、後に様々な運動へと利用されるためには、どのような特性を備えているのか。

手の届く範囲にある物体の位置の記憶表現について検討するために、提示された物体の位置を記憶し、数秒間の保持期間の後に、提示された位置をポインティングで再生する課題が用いられた。提示された位置を上肢運動によって遅延再生するには、少なくとも2種類の記憶・再生プロセスが考えられる。一つは、提示された物体の位置が視覚座標系での表現として記憶され、再生時に身体座標系に変換されて運動再生されるプロセス。もう一つは、提示された物体の位置が身体座標系にまで変換されたかたちで記録され、そのまま保持されて再生に利用されるというプロセス。実験結果から、ポインティング開始時の手の位置を中心とする手中心座標で位置が記憶されたことが分かり、後者の可能性が支持された¹⁶⁾。

手の届く範囲の近い空間では、物体を見て手や腕でアプローチする運動が行われる (visually-guided motor control)。このとき、物体の位置に関する視知覚情報を運動指令に変換する間に何らかのエラーが含まれても、物体と手先とのオンラインの距離情報や、物体に実際に触れて得られる体性感覚情報を利用することで、空間表現を修正できる。近い空間では、こうして得た精度のよい空間表現に基づいて、正確な運動が実現されると考えられる。手の届かない範囲の遠い空間では対照的に、視知覚情報のみから身体運動に利用可能な空間表現を構成していると考えられるわけだが、このときの空間表現にはどのような特性があるのか。そして、この空間表現は空間内での身体移動に伴ってダイナミックに更新 (視点変換) され、その場での運動に利用されることになるが、果たしてどのように更新されるのか。

この点を検討するために、近い空間でのポインティング課題と同じ手続きを用いて、手の届かない距離に提示された物体の位置の記憶表現について検討されている。Woodin と Allport¹⁵⁾は、手の届く距離の位置と届かない距離の位置へのポインティング特性を直接比較し、両条件で同じ行動特性となることを示した。吉田・乾²⁵⁾は、手の届かない距離に提示した対象の位置を記憶し、2秒後にポインティングで再生する課題を通して、身体を中心とする座標系で位置がコードされることを示した。以上のことから手の届かない範囲の遠い空間にある物体の位置は、手の届く範囲の近い空間の物体配置と同じように、運動計画を構築できるかたちに変換された表現で記憶イメージが保持されていることが分かる。

遠い空間は主として眼球運動の作業空間として機能するが、身体座標系でコードしたかたちで記憶イメージを形成することで、よりダイナミックな運動が容易に可能になる。この形式が広域空間のイメージの基本形であると位置づけられる。

11-3-2 空間内移動に伴うイメージの更新

更に、広域空間内では身体そのものの位置がダイナミックに変化する。つまり身体座標系の中心そのものが空間内を移動する。運動の実行には、身体座標系で表現された位置情報の更新が不可欠であるが、広域空間での運動には、このような身体移動に伴う身体座標系自体の位置更新も必要となる。

身体座標系でコードされた記憶イメージは、座標系中心に偏位する定位エラーが含まれている。空間内の移動後にも適切な空間表現を再構成するには、空間の知覚像と記憶イメージとのずれをいかに埋め合わせるかが重要であり、更新後の空間イメージに身体の移動をどれだけうまく反映させられるかがポイントになる。広域空間での身体移動は、並進による移動と回転による方向転換から構成される。それぞれについて、空間の記憶イメージの更新特性が行動学的に検討されていて、複数の実験結果から、並進と回転では身体運動のイメージ変換プロセスが異なる可能性が示されている²⁶⁻²⁸⁾。

(1) 並進による移動と記憶イメージの変換

助宮ら²⁷⁾は、遠い空間に提示された対象の位置記憶に対する身体の平行移動の影響を調べた。対象の位置を記録した後の、2秒間の保持期間中に、被験者自身で身体位置を左右いずれかに平行移動させる操作を挿入した。対象の位置は身体中心座標系でコード・記録されるはずだが、記録時と再生時で身体の位置が異なる。したがって、移動前＝記録時の身体位置を中心とした記憶表現と、移動後＝再生時の身体位置を中心として再構成された空間表現のいずれかがポインティング特性に現れることが予想される。実験の結果、平行移動後の再生では、定位エラーは移動後の位置の身体位置に偏ること、またエラーの大きさは移動量の大きさによらないことがわかった。この結果は、後者の空間表現がポインティングに利用されることを支持するものである。

この実験では、移動中の視野を遮蔽し、再生時に再度視野を与えるという操作を行った。これにより、保持期間中には自己受容感覚に由来する自己運動情報が得られ、記録時と再生時との視野の違いから、視覚に由来する身体移動情報が得られることになる。特に後者は、視野内に知覚される環境座標系の中心対象に基づいて、空間内での身体位置情報を環境座標系で獲得できる。自己受容性の身体運動情報と、視覚性の環境中心的身体位置情報とを協調的に利用することで、移動後の身体位置を中心とする座標系を使って運動を再構成できると考えられる。

(2) 回転による方向転換と記憶イメージの更新

Yoshida と Inui²⁸⁾は、遠い空間に提示された対象の位置記憶に対する身体の回転の影響を調べた。対象の位置を記録した後の、2秒間の保持期間中に、被験者自身で身体方位を時計回りか反時計回りのいずれかに回転させる操作を挿入した。そして回転後の方位を向いて、回転前に提示された対象の位置をポインティングで定位した。この実験でも、並進条件の実験と同様に、身体回転中の視野は遮蔽し、再生時に再度視野を与えた。並進の場合は、移動量にかかわらず、視野内に環境座標系の中心をなす物体を知覚でき、その結果、視覚性の身体移動情報を獲得して、移動後身体中心への変換が容易となる。回転の場合は対照的に、回転量の大きさによって視野の構成が変わる。したがって、回転量を操作することで、視覚性の身体移動情報の利用可能性を操作し、身体方位の変化量の影響を検討できる。

実験の結果、回転量の増加に伴って定位エラーが増大すること、定位エラーは回転前の方

位を向く身体中心に偏ることが示された(身体方位依存性)。この結果は身体並進後の位置記憶と大きく異なり、記銘時=回転前の空間イメージが利用されやすいことを意味する。これは環境座標系による視覚性の身体移動情報の利用可能性が強く影響したものと考えられる。

(3) 空間内移動のイメージと空間イメージの更新

記憶した空間のイメージに対して、空間内移動のイメージを加えて、異なる身体位置での空間構造を想像するプロセスを経て、空間をイメージ上で変換操作することができる。空間の記憶イメージは、記銘時の身体位置に向かって偏るかたちで構築される。また、そのイメージの変換に加わる身体の運動情報は、並進と回転とで異なる効果を示す。この身体運動情報がイメージに由来する場合、空間の記憶イメージは更新されてどのようなようになるのか。

多くの行動学的事実から、身体移動をイメージして変換した空間記憶は実際に身体移動を行った場合と基本的に同じ行動特性を示す²⁹⁻³²⁾。また、身体の並進運動と回転運動で変換イメージが異なる点も同じである²⁶⁾。しかし、特に回転運動については、運動をイメージする場合には、実際の運動する場合よりも定位エラーが大きく、かつ定位判断にかかる時間が長くなる^{33, 32)}。身体移動のイメージと実際の運動情報の利用とでは何が違うのか。Farrell と Robertson³⁴⁾は、特に身体の回転運動について、運動イメージによる位置記憶の変換と、実際の運動による変換との違いを検討している。実際に回転運動をしたあとに、その運動を無視して、回転前の身体方位に対する位置の想起を求めると、回転後の身体方位を中心とする定位が行われた。このときのイメージ変換過程には、自己受容性の運動情報と、逆向きの回転運動イメージとの両方が利用される。回転運動のイメージは回転前の身体方位を中心とする空間イメージに変換するのだが、ここでは実際の運動とは逆向きの回転運動をイメージするため、イメージ上の回転前、すなわち実際の回転運動後の身体方位を中心とする空間イメージに変換されることになる。自己受容性運動情報は安定した視野を自動的に構成する感覚情報であるため、空間イメージを回転後の身体方位を中心とした表現に半自動的に変換すると考えられる。身体移動のイメージと実際の運動情報とのイメージ変換の違いは、移動イメージと視覚性身体移動情報との間でも検討されており、視覚性身体移動情報を利用して空間構造の再配置の学習が進むことにより、空間イメージは移動イメージによる身体方位依存性の影響を受けにくく安定すると考えられている³²⁾。

11-3-3 安定な空間イメージの構成

身体移動に伴う更新を適切に行うには、身体の移動量と移動方向に関する情報が必要である。身体を動かすと、視覚的にはオプティカルフローが生じ、同時に自己受容感覚も得られる。これら2種類の感覚入力、身体の移動方向と移動量の推定に利用できる。これらの運動情報が空間表現の変換にどのように関与するのか。この点を検討するには、頭部を動かしても安定な視野をもたらす前庭動眼反射(vestibulo-occulomotor reflex: VOR)が参考になる。VORは、頭部の回転運動を伝える自己受容感覚に対して、逆向きの眼球運動信号を反射的に機能させることで視線を固定させ、安定な視覚像を実現するメカニズムである。頭の回転の角速度に対する逆向きの眼球運動の角速度の大きさをVORの反射ゲインとする。ゲインが1のときに視線が固定されることになる。ヒトでは暗所で頭を回転させると、前庭信号のみに基づいてVORを発生させた場合、ゲインが0.6~0.8となりVORのみでは視線が固定されないことが分かっている。一方、明所ではVORの反射ゲインが1となり、視線が固定されて

安定な視野を得ることができる³⁵⁾。このことは、視空間像を変換し、ダイナミックな運動を可能にする安定な空間表現を得るには、身体運動に関する自己受容感覚情報のみでは不十分であるが、外部空間が観察でき、オプティカルフローを知覚することで、空間に対する身体位置の視覚情報が得られ、正確な変換が実現できることを意味している。外部空間の視覚情報とオプティカルフローは、環境中心座標系による空間配置、及び身体位置の情報をもたらすことから、環境座標系による空間表現と身体位置表現の利用が重要であることが分かる。しかし、環境座標系による空間表現のみを利用して定位しても精度は悪く、身体座標系表現と同様に、座標系中心に偏って定位されると推定されている²⁵⁾。以上のことを総合すると、安定な空間イメージの形成には、行動主体の身体を中心とする身体座標系に基づく記憶イメージに対して、身体移動のイメージ、空間内での身体移動に伴う自己受容性運動情報と視覚性移動情報とが協調的に寄与すること不可欠であると分かる。

■参考文献■

- 1) Previc, F.H., "The neuropsychology of 3-D space," *Psychological Bulletin*, vol.124, pp.123-164, 1998.
- 2) Brain, W.R., "Visual disorientation with special reference to lesions of the right cerebral hemisphere," *Brain*, vol.64, pp.244-272, 1941.
- 3) Halligan, P.W. and Marshall, J.C., "Left neglect for near but not far space in man" *Nature*, vol.350, pp.498-500, 1991.
- 4) Cowey, A., Small, M., and Ellis, S., "Left visuo-spatial neglect can be worse in far than in near space," *Neuropsychologia*, vol.32, pp.1059-1066, 1994.
- 5) Rizzolatti, G., Matelli, M., and Pavasi, G., "Deficits in attention and movement following the removal of postarcuate (area 6) and prearcuate (area 8) cortex of macaque monkeys," *Brain*, vol.106, pp.655-673, 1983.
- 6) Milner, A.D., "Animal models for the syndrome of spatial neglect," *Neurophysiological and Neuropsychological Aspects of Spatial Neglect*, M. Jeannerod ed., Amsterdam: Elsevier, pp.259-288, 1987.
- 7) Iacoboni, M., Woods, R.P., Lenzi, G.L., and Mazziotta, J.C., "Merging of oculomotor and somatomotor space coding in the human right precentral gyrus", *Brain*, vol.120, pp.1635-1645, 1997.
- 8) Lacquaniti, F., Perani, D., Guiton, E., Bettinardi, V., Carrozzo, M., Grassi, F., Rossetti, Y., and Fazio, F., "Visuomotor transformations for reaching to memorized targets: A PET study," *NeuroImage*, vol.5, pp.129-146, 1997.
- 9) Sochting, J.F. and Flanders, M., "Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space," *Journal of Neurophysiology*, vol.62, pp.582-594, 1989.
- 10) Gentilucci, M. and Negrotti, A., "Dissociation between perception and visuomotor transformation during reproduction of remembered distance," *Journal of Neurophysiology*, vol.72, pp.2026-2030, 1994.
- 11) Gentilucci, and Negrotti, A., "Mechanisms of distance reproduction in perceptual and motor skills," *Experimental Brain Research*, vol.108, pp.140-146, 1996.
- 12) Gentilucci, M., Daprati, E., Saetti, M.C., and Toni, I., "On the role of the egocentric and the allocentric frame of reference in the control of arm movements," *Parietal Lobe Contributions to Orientation in 3D Space*, P. Their and H.-O. Karnath, eds., Heidelberg: Springer-Verlag, pp.341-354, 1997.
- 13) McIntyre, J., Stratta, F., and Lacquaniti, F., "Viewer-centered frame of reference of pointing to memorized targets in three-dimensional space," *Journal of Neurophysiology*, vol.78, pp.1601-1618, 1997.
- 14) McIntyre, J., Stratta, F., and Lacquaniti, F., "Short-term memory for visual targets: Psychophysical evidence for body-centered reference frames," *The Journal of Neuroscience*, vol.18, pp.8423-8435, 1998.
- 15) Woodin, M.E. and Allport, A., "Independent reference frames in human spatial memory: Body-centered and environment-centered coding in near and far space," *Memory and Cognition*, vol.26, pp.1109-1116, 1998.
- 16) Chieffi, S., Allport, A., and Woodin, M. E., "Independent coding of target distance and direction in

- visuo-spatial working memory,” *Neuropsychologia*, vol.37, pp.495-502, 1999.
- 17) Marr, D., “Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information,” W. H. Freeman and Company, 1982. [デビッド・マー (著), 乾 敏郎・安藤広志 (訳), “ビジョン: 視覚の計算理論と脳内表現,” 東京: 産業図書]
 - 18) Taylor, M. M., “Effect of anchoring and distance perception on the reproduction of forms,” *Perceptual and Motor Skills*, vol.12, pp.203-230, 1961.
 - 19) Dale, H.C.A., “Short-term memory for visual information,” *British Journal of Psychology*, vol.64, pp.1-8, 1973.
 - 20) Conti, P. and Beaubaton, D., “Role of structured visual field and visual reafference in accuracy of pointing movements,” *Perceptual and Motor Skills*, vol.50, pp.239-241, 1980.
 - 21) Andersen, R.A., Asanuma, C., and Cowan, W.M., “Callosal and prefrontal associational projecting cell populations in area 7a of the macaque monkey: A study using retrogradely transported fluorescent dyes,” *Journal of Computational Neuroscience*, vol.232, pp.443-455, 1985.
 - 22) Zipsper, D. and Andersen, R.A., “A back-propagation programmed network that simulated response properties of a subset of posterior parietal neurons,” *Nature*, vol.331, pp.679-684, 1988.
 - 23) Brotchie, P.R., Andersen, R.A., Snyder, L.H., and Goodman, S.J., “Head position signals used by parietal neurons to encode locations of visual stimuli,” *Nature*, vol.375, pp.232-235, 1995.
 - 24) Snyder, L.H., Grieve, K.L., Brotchie, P., and Andersen, R.A., “Separate body- and world-referenced representations of visual space in parietal cortex,” *Nature*, vol.394, pp.887-891, 1998.
 - 25) 吉田千里・乾 敏郎, “パーソナルスペースでのポインティングにおける身体/環境中心的情報の統合的利用,” *認知科学*, vol.10(2), pp.244-257, 2003.
 - 26) Presson, C.C. and Montello, D.R., “Updating after rotational and translational body movements: Coordinate structure of perspective space,” *Perception*, vol.23, pp.1447-1455, 1994.
 - 27) 助宮 治・吉田千里・乾 敏郎, “ポインティング課題を用いた空間認知特性の検討: 平行移動による影響,” *信学技報*, HCS2001-42, pp.61-66, 2002.
 - 28) Yoshida, C. and Inui, T.: “Transformation process of the visuomotor memory representation of a target in far space after body rotation”, *Psychologia*, 47(2), pp.79-95 (2004)
 - 29) Roskos-Ewolden, B., McNamara, T. P., Shelton, A. L., and Carr, W.: “Mental representations of large and small layouts are orientation dependent”, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2, pp.215-226 (1998)
 - 30) Diwadkar, V. A. and McNamara, T. P.: “Viewpoint dependence in scene recognition”, *Psychological Science*, 8, pp.302-307 (1997)
 - 31) Shelton, A. and McNamara, T. P.: “Multiple views of spatial memory”, *Psychonomic Bulletin & Review*, 4, pp.102-106 (1997)
 - 32) 朝倉暢彦・近江政雄・鈴木良次: “空間記憶の身体方向依存性に及ぼす自己運動情報の効果”, *信学技報*, HIP99-27, pp.1-8 (1999)
 - 33) Rieser, J. J.: “Access to knowledge of spatial structure at novel points of observation”, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, pp.1157-1165 (1989)
 - 34) Farrell, M. J. and Robertson, I. H.: “Mental rotation and the automatic updating of body-centered spatial relationships”, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24, pp.227-233 (1998)
 - 35) 笠井 健: “生体の感覚統合モデル”, *センサーフュージョン: 実世界の能動的理解と知的再構成*, 第5章, 山崎弘郎・石川正俊 (編著) 科学技術庁 (監修), 東京: コロナ社 (1992)