解 説

ロボットシステムの「正しい」動作と合目的性 —科学哲学的観点から見たロボット工学の特徴—

“Correct” Functioning of Robotic Systems and Purposiveness: Methodological Characteristics of Robotics from the Viewpoint of Philosophy of Science

小 山 虎* *大阪大学
Tora Koyama* *Osaka University

1. はじめに

本稿では、科学哲学的観点から見たときのロボット工学の特徴を解説する。科学哲学とは、科学の方法論や基礎概念などの研究を通じて、科学を理解することを目指す研究分野のことであり、その対象として物理学や生物学といった個別の科学が選ばれることもよくある。

現状ではロボット工学を対象にした研究はほとんど見られないが、筆者は2010年よりロボット工学を対象とした科学哲学的研究を行っており、いくつかの予備的知見が得られている。本稿では、他の自然科学にはあまり見られない特徴をいくつか紹介し、そのような違いを「合目的性」という概念を用いて説明する。

おそらく多くの研究者は、ロボット工学と他の自然科学（特に物理学）との違いについてそれほど認識していないと想像される。だが、こうした違いを認識しておくことは、そもそも自分たちがどのようなタイプの研究を行っているかを自覚することに役立つものであり、ロボット工学の発展に寄与するものと考えられる。

2. 自然科学の方法論

まず、自然科学の一般的な方法論を確認しておくことから始めたい。自然科学の方法論の典型は実験や観察である。注意深く設定された実験や観察によって正しいことが確かめられた事実のうえに科学は成り立っている。このように考える人は、かなりの数に上ることだろう。科学者であれば、より洗練された考えを持っているだろう。例えば、まず仮説を立て、その仮説が正しいかどうかを実験によって検証するのが科学である、と言われるかもしれない。しかし、このような説明はまだ足りないところがある。

2.1 実験における理論

実験や観察をするには、それによって検証が試みられる仮説だけでなく、そもそも何を観察するかを定める理論が

必要である。また、観察結果が仮説と食い違うとき、確かに通常は仮説が否定されるが、場合によっては仮説だけでなく、理論全体が否定される。理論全体が否定された例として有名なのはマイケルソン・モーリーの実験である。マイケルソン・モーリーの実験はエーテルの存在を否定した実験として知られているが、元々の目的はエーテルに対する地球の相対速度を測定する実験であり、エーテルが存在するという仮説を検証する実験ではなかった。しかし、うまく測定できなかったがために、当時は当然視されていたエーテルの存在を否定することにつながったのである。このように、実験や観察によって検証されたり反証されたりするのは、個々の仮説に留まらず、背景となっている理論にまで及ぶことがある。また、実験結果をどのように解釈するかには、理論が影響を及ぼす。問題の結果がどういう意味を持つかは、理論の中で位置づけられるからである（これは観察の理論負荷性と呼ばれる[1]）。

2.2 検証と仮説検定

仮説の検証に関しても、もう少し慎重な説明が求められる。仮説とは特定の条件が満たされればある現象が必ず生じることを述べたものである。よって、仮説を検証するには、条件が満たされたときには、仮説の述べたとおりに予測された現象（これは「予測」または「予言」と呼ばれる）が必ず生じていることを確かめる必要がある。だが、この「必ず生じる」の「必ず」を厳密に理解するならば、それを確かめる方法は数学的証明のみである。どれだけ実験や観察を繰り返しても、次の実験結果は予測と食い違う可能性を拭い去ることはできないため、「必ず生じる」ということは保証されない。科学哲学者のカール・ポパーは、この「必ず」を厳密な意味で捉え、検証は不可能でも反証は可能であることから（反例が見つければよい）、仮説の検証ではなく反証こそが科学の特徴であると主張したことで知られている（ポパーの考えは「反証主義」と呼ばれている[2]）。しかし、ただ仮説を反証するだけでは、確かめられた事実を積み重ねて前進することはできなくなる。現在、統計的仮説検定が一般的に用いられているのは、こうした考察を踏まえてのことである（少なくとも、科学哲学的観点からはそのように説明できる）。統計的仮説検定では、予測された

原稿受付 2016年4月25日

キーワード: Philosophy of Science, Philosophy of Robotics, Methodological Characteristics, Purposiveness

*〒560-8531 豊中市待兼山町1-3

*Toyonaka-shi, Osaka

現象が必ず生じることを直接確かめるわけではない。まず予測された現象が生じることは偶然に過ぎないという帰無仮説を立て、それが一定の有意水準の下で棄却されることを実験や観察によって確かめる。つまり、「必ず生じる」という仮説を確かめるのではなく、「偶然生じたに過ぎない」という仮説が正しいことは考えにくいことを確かめるのである。これは本来の意味での仮説の検証とは厳密には異なる。「偶然生じたに過ぎないのではない」が確かめられたのであれば「必ず生じる」も確かめられたと言ってよいかもしれないが、一定の有意水準の下で『偶然生じたに過ぎない』とは考えにくい」が確かめられるだけだからである。しかし、同様の結果が積み重なっていけば、「その仮説がおそらく正しいことは確かめられている」という慎重な言い方であれば許されるであろう。

このように、自然科学の方法論では、実験や仮説に加え、理論や予測も大きな役割を果たしている。このことは科学哲学の教科書に載っているような内容であり（例えば、文献[3][4]）、研究者であればどこかで学んでいるはずの基本事項であると言ってよいだろう。したがって、こうしたことはロボット工学においても、多少の違いこそあれ基本的には同様に成り立っていることが期待される。ところが、現実にはいくつかの違いが見られる。

3. ロボット工学の方法論的特徴

ロボット工学の方法論に関する特徴は、前述の自然科学の方法論と比較することで明確化できる。以下では、まず設計と理論の役割に共通点があることを説明し、それに基づいて、(i) 設計と実装、(ii) 擾乱、(ii) 実証実験の三点から、ロボット工学の方法論的特徴を説明する。

3.1 設計と理論に共通する役割

まず、ロボットシステムの開発で検証されるのは、一般的には、実際に開発されたロボットがどのような性能を持っているかではなく、そのロボットシステムの設計のほうである。もちろん評価実験では実際に開発されたロボットの性能が実験の対象になるが、もしロボットの性能のみが問題なのであれば、論文中でなされる設計や機構の説明はそのロボットの紹介のようなものであり、実験内容や結果、その解釈が大半を占めていてもよいはずである。むしろ、まず設計があり、設計に合わせてロボットを製作し、評価実験を行うという研究の流れを考えれば、ロボットシステムの開発には、開発されたロボットがどのような性能を持つかに加え、どうしてそのロボットは評価実験で示されたような性能を持つかの「説明」も含まれると考える方が実情に合っていると思われる。

自然科学では、実験結果の説明は、理論と仮説によって与えられるのが一般的である。例えば、理論を前提したときに仮説が正しければ実験結果が確実に得られる（理論的

には演繹的に導出される）、という形で説明される。ロボットシステムの開発では、システムの構成や設計がこうした説明の役割を担っていると思われる（実際、システムの構成や設計では、物理法則やそれに類する式が使われる）。この点で、設計は理論と類比的だと言える。一般にロボット研究では理論という言葉はあまり使われないが、ロボットシステムの設計は、自然科学における理論と類比的な役割を果たしていると考えれば、設計が実験によって検証されることは、理論が実験によって検証されることと基本的には同じこととして理解できる。

3.2 設計と実装

設計と理論が似た役割を果たしているのなら、ロボットシステムの開発では、「その設計に基づいて製作されたロボットが目標の性能を持っていることは偶然でない」ということが評価実験によって確かめられていると考えられる。すなわち、実際に製作されたロボットは、高エネルギー物理学における加速器や神経科学におけるMRIのような実験装置として位置づけられることになる。

このことは、人によっては当たり前のように聞こえるかもしれない。例えば情報科学では、提案されたアルゴリズムの性能についての仮説が立てられるだろう。評価実験ではそのアルゴリズムを実装したプログラムが用いられるが、プログラムそのものは実装にすぎない。そのプログラムは実験をするために作られたものであり、それ自体は仮説にとって本質的ではない。

しかし、試作機を除けば、製作されたロボットを単なる実験装置とみなすのはあまり適切ではない。プログラムが提案手法の実装になっていないのであれば、どんな結果が出ても失敗である。素粒子実験でもこの点は変わらない。2011年にOPERAという国際研究グループが光より速くニュートリノが移動したという実験結果を報告したが、その後の検証により実験装置に不備があったことが明らかになり、当初の報告は撤回された[5]。しかし、ロボットが設計を厳密には実装していないことが判明したとしても、そのロボットが目標の性能を達成したという結果は動かない。ロボットシステム開発の目的は、ある課題を解決する手法の提案として特徴付けられることがある。もしこれが正しければ、製作されたロボットが実際にその課題を解決したことは無視できない。

つまり、ロボットシステムの開発では、実装に誤りがあることが判明したからといって、ただちに実験結果が無価値になるわけではないのである。これは他の科学ではあまり見られない点である。

3.3 擾乱

擾乱に関しても、他の科学との違いが見られる。ロボットシステムの特徴の一つは、実世界で動作するシステムであることである。実世界には様々な擾乱があり、設定され

た課題を達成するには、擾乱からの影響を適切に回避する複雑な情報処理を行うことが要求される。しかし、設計の際に、あらゆる擾乱を考慮に入れることは非現実的である。むしろ、擾乱のある環境下でもロボストに動作することが求められる。

自然科学の場合、擾乱はあくまで擾乱であり、擾乱のない理想状態を考えることが多い。理論や仮説の検証という目的であれば、擾乱なしの環境で測定された値が正しい値（真値）だと考えてよい。「真値＝測定値－誤差」という定義はそれを反映していると考えられる。実際、実験装置にとって擾乱はノイズでありアーティファクトの原因となるため、様々な擾乱をできる限り吸収することが求められる。一方、ロボットシステムの場合、擾乱なしの環境を考えることはそれほど重要ではない。むしろ擾乱があることは大前提であり、擾乱がまったくない実験環境で測定された値は、そのロボットの性能を正しく表していると言えないという意味で、正しい値ではない。

3.4 実証実験

上記の二点、すなわち、(i) ロボットシステムでは課題の達成が実装の正しさよりも重視されうること、そして、(ii) 擾乱なしの環境よりも擾乱ありの環境を考えるほうが適切であること、の二点は、実証実験の位置付けに関係している。設計についての仮説が実証実験によって検証できるとは考えにくい。実証実験では、厳密な統制も再現実験も現実的ではないため、仮説が確かめられたと言えるほどの結果を積み重ねることが難しいからである。しかし、当該のロボット（または、ロボットおよび当該の実験環境の組み合わせ）に関する仮説であれば話は別である。当該のロボットがその実験環境において目的の効果をもたらすことは、仮説検定によって確かめることができる。

理論についての仮説は一般性が高く、精密に設計された実験装置を使い、完全に統制された環境下での実験でない、確かめられたと言えるまでには至らない。設計はここでも理論と類比的であり、設計についての仮説も一般性が高いため、極めて精密に設計されたのでない限り、1 台のロボットだけを使って、完全には統制されていない環境下での実験によって確かめることはできない。しかし、一般性が低い仮説、例えば、個別のロボットの特定の環境下での振る舞いに関する仮説では、そういった問題は生じない。つまり、実証実験は、典型的な自然科学の実験のような、理論を背景にした仮説の検証をしているとみなすことには困難があるが、開発したロボットが擾乱ありの環境下で課題が達成できることの検証には、何の問題もないのである。このように、ロボットシステム開発において実証実験が重要視されることは、これまでに述べた自然科学との違いから生じているとして理解できる。

4. ロボット工学と合目的性

ロボット工学と自然科学との間にこのような違いがあるのはどうしてだろうか。この問いには、「合目的性」という概念を用いて答えを与えることができる。

4.1 「合目的性」とは何か

「合目的性」とは、説明に関する概念の一つである。科学的な説明は、**数学的説明**（証明に代表される演繹推論を使う説明）か**因果的説明**（因果関係やメカニズムを使う説明）のどちらかであることが多い。これに対し、日常生活では、目的を使う説明がよく見られる。例えば、目覚まし時計をセットすることの理由を聞かれて、明日の朝に重要なミーティングに遅れないように、と説明するケースで考えよう。明日の朝のミーティングは、目覚まし時計のセットより後の事象であるため、目覚まし時計をセットすることの原因にはなりえない（原因は結果より時間的に先行していなければならない）。しかし、目覚まし時計をセットすることは、ミーティングに遅れないことの原因になりうる。このような原因の代わりに結果を使う説明のことを、哲学では「**目的論的説明**」と呼ぶ[6]。この場合の原因と結果の関係は、手段と目的の関係になっているためである。そして、「合目的性」とは、手段が目的に対して適切である（要するに、目的に合っている）ということである。

目的論的説明と因果的説明は、どちらも因果関係が関与しているため類似しているが、原因と結果の説明上の役割が逆転しているという点が異なっている。特に、目的は必ずしも実現されるとは限らず、また手段も目的の実現を保証する必要があるのに対し、原因は存在しないことはありえず、原因によって結果が不可避になる（少なくとも偶然生じたのではない）ことが要求される。自然科学によって与えられる説明が**数学的説明**と**因果的説明**であることが多いのは、どちらも 2.2 節で述べた「必ず生じる」ことの説明に適しているためだと思われる。

目的論的説明は自然科学では一切使われないというわけではない。例えば生物学では、鳥が羽毛を持つことの説明として、羽毛を持つに至った原因を特定するのではなく、羽毛を持つことによって体温調節が容易になったり、羽毛を利用した威嚇やカモフラージュが可能になったことが挙げられる。これらはすべて目的論的説明である。

4.2 設計と理論の相違点

設計と理論には共通点があることは何度も述べてきたが、もちろん相違点もある。設計と理論の最大の相違点は、**説明には目的があること**である（それに対し、理論に目的はない）。そのため、設計が与える説明は目的論的説明となる。つまり、開発されたロボットがある性能を持つことは、そのロボットの設計目的にその性能を持つことが含まれていたからだ、という形で説明される。一方、理論が与える

説明は因果的説明となる。つまり、開発されたロボットがある性能を持つことは、適切な背景理論（大抵は物理理論）のもとで、原因である要件が成立していたからだ、という形で説明される。

こうした違いは、単に説明の際に使われる言葉の違いではない。因果的説明と目的論的説明では、正当な説明であることの要件が異なっている。例えば、因果的説明にとって実装の正しさは必須事項である。実装に誤りがあれば、それが実験結果の要因になっていることがありうるからだ。一方、目的論的説明にとってはそうではない。実装に多少の誤りがあっても設計目的は実現されうるからである。3.1節で、設計と理論は実験結果の説明を与えるという点で類比的だと考えられることを紹介したが、両者の与える説明はこのように異なっているのである。

設計目的が詳細に特定されたものであったり、システムが複雑でないために目的の実現を十分保証できるような設計であった場合、両者の違いは見えにくくなる。だが、実世界で動作するロボットシステムの場合、システムはある程度複雑にならざるをえないし、設計段階で目的を詳細に特定することも困難である。よって、ロボットシステムの開発では一般的に、因果的説明と目的論的説明は異なると考えられる。

4.3 因果的な正しさと目的論的な正しさ

こうした説明の違いから引き出される結論の一つは、ロボットシステムが正しく動作しているかどうか二種類の観点から評価できることである。因果的観点からは、その動作が設計時に想定されたプロセスをすべて経由して引き起こされた場合、つまり、設計段階で想定されていた因果関係がきちんと再現されているときに「正しい」と言える。一方、目的論的観点からは、その動作が設計目的に合致している場合、つまり、その動作が合目的性を持っているときに「正しい」といえる。よって、実装に誤りがあれば、設

計どおりのプロセスを経ていないので正しく動作したとは言えないが、その一方で、設計において設定された目的が達成されているのであれば、合目的性の観点から見れば正しく動作したと言える。

5. ま と め

本稿では、科学哲学的観点から、ロボット工学と他の自然科学の間の違いを方法論を比較することで解説した。また、こうした違いを説明様式の違いから説明した。設計によって与えられる説明は、理論によって与えられる因果的説明とは別種の目的論的説明と呼ばれるものである。そして、ロボットシステムの動作の正しさも目的論的に、すなわち、設計目的に合致しているか（合目的性）という観点から評価することができることを説明した。

参 考 文 献

- [1] N.R. ハンソン：科学的発見のパターン。講談社、1986.
- [2] カール・ポパー：科学的発見の論理 上・下。恒星社厚生閣、1971/1972.
- [3] 伊勢田哲治：疑似科学と科学の哲学。名古屋大学出版会、2002.
- [4] 森田邦久：理系人に役立つ科学哲学。化学同人、2010.
- [5] CERN ホームページ：OPERA experiment reports anomaly in flight time of neutrinos from CERN to Gran Sasso, <http://press.cern/press-releases/2011/09/opera-experiment-reports-anomaly-flight-time-neutrinos-cern-gran-sasso>
- [6] G.H. ウリクト：説明と理解。産業図書、1984.

小山 虎 (Tora Koyama)

2004 年大阪大学人間科学研究科博士課程修了。専門は哲学（分析哲学）。日本学術振興会特別研究員（PD、慶應義塾大学）、米国ラトガース大学哲学科客員研究員等を経て、2010 年より大阪大学基礎工学研究科にてロボット工学と哲学の融合研究に従事。現在大阪大学基礎工学研究科特任助教、ERATO 石黒プロジェクト研究推進主任、日本科学哲学会、科学基礎論学会、応用哲学会会員。（日本ロボット学会正会員）