

氏名	森 智史
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 942 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	物体形状オントロジーに基づく指示形状物体の認識
論文審査委員	委員長 教授 久野 義徳 委員 教授 前川 仁 委員 准教授 内田 淳史 委員 准教授 小室 孝

論文の内容の要旨

頼まれたものを取ってきてくれるようなサービスロボットを実現するためには、物体認識の能力が必要である。物体認識の技術は進歩しているが、まだ複雑な環境で自動で確実に物体の認識を行うことは難しい。そこで、自動で認識できない場合には、ユーザから対象物の属性についての情報を対話を通じて与えてもらうことで認識を行う対話物体認識を検討している。しかし、人間の表現は多様であり、同じものに対して様々な表現を用いたり、同じ表現でも状況により違った物体を指すことがある。そこで、そのような多様な表現を整理して、それに対応したシステムを実現するために、対話物体認識用のオントロジーを検討した。今回は、表現の多様性が特に顕著な形状属性について実際にオントロジーを構築し、対話による形状認識の実験システムを実現した。様々な日用品を用いた実験によりオントロジーに基づく認識の有効性を確認した。

第 1 章では、現状での世の中の技術の問題点を整理し、本研究の目的、背景、課題を示す。また、第 2 章以降には、問題のアプローチや実験方法、解決方法、実験評価等を示す。

第 2 章では、参加者を用いた会話実験で、どのような形状表現が使われるか調べた。人間同士の対話の観測実験（実験 1）を行うために、サービスロボットに持ってきて欲しいと思う食べ物や文房具などの物体を集めた。テーブルに多数の生活用品をランダムに配置しておき、「指示者」と「回答者」を組とする。指示者は回答者に欲しい物の形状を伝える。回答者は依頼された物が何かを判断して、推定物を回答する。今回の実験 1 で、回答者には「形状を表現するように」と指示した。ただし、それ以上の細かい指示はしなかった。10 組の参加者（全員、大学生）に対して伝達実験を行い、143 の形状表現を収集した。

また、実験 1 を通じて、同じ表現でも異なる幾何学的形状を指す場合があることに気付いた。同じ言葉で表現される可能性のある物体が複数あった場合、その言葉ではどの物体が指示されるか調べることにした。例として「丸いもの」という表現について、Thurstone の比較判断の法則に基づく一対比較法を用いて実験的に調べた（実験 2）。57 人の参加者（全員、大学生）の協力を得て、「丸い」に該当する形状の優先度を計測することができた。

実験 1,2 により収集した「人の形状表現の語句」と「ロボットが理解できる表現」を結び付け、オントロジー（体系化）を作成した。オントロジーの構築には大阪大学で開発された法造を用いた。この形状表現に関するオントロジーは、ロボットが人間の依頼内容を理解するための知識となる。

第3章では、収集した物体表現に基づいて作成した物体認識システムについて述べる。画像検出用のカメラは、Kinect（マイクロソフト、深度センサー付き赤外線カメラ、RGBカメラ）を用いる。Kinectの深度センサーにより、Kinectを用いて、物体の領域を検出し、対象物の領域を構成する画素の3次元座標を検出する。3次元座標データから、物体の幾何学形状を判定する。また、法線ベクトルを計算し、ベクトルの数と向きにより、物体を構成する面の数と向きを確認し、物体の凹凸部分を検出することを検討している。

また、第2章で作成した「人が表現に用いる形状特徴」を体系化したオントロジーの構成を元に、各々の形状特徴検出のプログラムの構成や関連性を整理することができた。

第4章では、第3章で作成した物体認識システムを用いた対話形状認識システムについて述べる。ロボットは、フランスのAldebaran Robotics社が開発・生産しているNAOを用いる。ロボット（もしくはPC）の視覚機能として、マイクロソフト社のカメラKinectを用いる。

実験にユーザに名前でも指示された物体に対して自動認識を行い、それが検出できない場合に対話物体認識に入るという統合物体認識システムの実現を目指して開発を進めている。ここでは、形状だけでなく、色や材質、それに位置関係など、その場の状況に応じた適当な属性について対話を行う方法を検討することを考えている。今回は、第2章で提案した「物体形状のオントロジー」の有効性を確認するために、「形状」に関する対話の部分に限った実験システムを開発した。「物体形状のオントロジー」を用いて、ロボットに人の命令を理解させ、人が求めている物体に該当する物をカメラ画像上から検出する。候補が複数ある場合には、第2章の実験2のように優先度をつける設定にする。

第5章では、対話物体認識システムの有用性を検証するために行った実験について述べる。2章の実験で用いた物体から3～5個程度を選び、テーブルの上に置き、形状に関する対話の実験を行った。実験で使用された対話回数と、認識の成功・失敗の割合を調べ、システムの性能を確認した。

最後に、第6章で上記の研究のまとめと今後の課題について述べる。

論文の審査結果の要旨

当論文審査委員会は、当該論文の発表会を平成 26 年 1 月 27 日に公開で開催し、詳細な質問を行い論文内容の審査を行った。その論文発表を含む学位論文の審査の結果、本提出論文を博士（工学）の学位論文として合格と判定した。以下に審査結果の要約を示す。

本提出論文はコンピュータビジョン分野における物体認識に関するものである。物体認識は頑健な局所特徴量と統計的機械学習の利用により進展してきているが、まだ、どのような環境でも確実に多くの物体を認識できるというような状況ではない。そこで、自動での認識に失敗したら人間に関連情報を教えてもらい認識を試みるという対話物体認識が検討されている。対話物体認識では、これまでに物体の色や空間的な位置関係を使うものが検討されているが、本論文は物体の形状について検討している。形状に関する情報という幾何学形状を表すものということになるが、人間の形状に関する表現は複雑である。例えば、「丸い」という表現が球を表す場合と円を表す場合があるように、同じ表現でも異なる幾何形状を表す場合がある。また、特に明示的な表現がなくても、ある表現が物体全体の形状を示す場合やある方向から見た形状を示すというように、異なるものを指す場合もある。本論文は、このような複雑な人間の形状表現に関する知識を表すオントロジーを構築し、それを用いて人間の形状表現を理解し、指示された形状の物体を認識する方法を提案するものである。

本論文は 6 章からなる。まず、第 1 章では、上述のような研究の背景と目的を述べ、物体認識とオントロジーについて関連研究をまとめている。

第 2 章では、はじめに、被験者を用いた実験により人間の形状表現を調査している。テーブルの上に多数の物体を置き、被験者は指示者と回答者の 2 人 1 組となり、指示者は回答者に対象となる物体の形状を回答者が正答するまで繰り返し伝える。そして、そこで用いられる表現を収集する。その結果、物体の形状を表す際には、全体の 3 次元形状を表現する場合や、ある方向から見た形を表現する場合など、特に明示しなくてもいろいろな場合があることが明らかになった。また、同じ表現でも異なる幾何形状を表すことも分かった。そこで、特に実験の際に多く用いられた「丸い」という表現についてさらに調査を行った。「丸い」と表現される可能性のある物体について、そこから 2 つを選び、どちらが「丸い」かを聞くということすべての組合せについて行う一対比較法により、「丸い」物体の中での「丸さ」の尺度を構成した。その結果、球のような 3 次元形状の方が、円のような 2 次元的な形状より、丸いと感じられることが分かった。これは、例えばシーンの中にボールと皿があった場合に「丸いもの」と言われたときは、ボールの方を指している可能性が大きいということを示している。

次に、以上のような知識を体系化するオントロジーを提案している。このオントロジーでは通常の世界に存在する物体、およびその幾何形状等の属性を体系化するのに加え、自然言語による属性表現を体系化している。形状に関しては、この部分はどこについて言及しているかを表す対象表現とどういう形を示しているかという属性表現に分かれる。属性表現のところには、その表現の表す可能性のある物理形状（幾何学形状）が、可能性の大きい順に示されている。

第 3 章では、カラー画像と距離画像の得られるセンサ（マイクロソフト Kinect）を用い、指定された幾何形状を画像から認識する方法を示している。自然言語による属性表現に対応できるように、物体の全体形状だけでなく、部分形状についても認識する方法を検討している。

第 4 章では小型 2 足歩行ロボット（Aldebaran Robotics 社、Nao）を用い、ユーザと形状について対話して、対象物を認識するシステムを示している。音声認識によりユーザの発話を認識し、オントロジーを用いて発話内容から指示された形状を理解する。そして、画像からその指示された形状を検出する。このロボットで

は物体を取って来ることはできないので、認識した物体を指差すようになっている。

第5章では、開発したロボットを用いて物体認識の実験を行った結果を述べている。はじめに、様々な状況のシーンを用意して、想定した動作をするかの確認実験を行った。次に、実際に被験者による対話物体認識の実験を行った。10人の被験者で150回の実験を行い、平均1.56回の対話で、133回認識に成功した（成功率89%）。対話物体認識なので、失敗しても、その物体を除外していけば、最終的には成功するはずだが、今回は形状に関する対話だけで、被験者が指示する形状表現を思いつかなくなった場合に失敗としている。この実験ではすべての被験者に対して同じシーンをを用いたが、さらに被験者ごとに違う50のシーンでも実験を行い、平均対話数1.78回で43回成功した（成功率86%）。以上の実験結果より、提案の方法の有効性が示された。

最後に第6章で、論文の内容をまとめ、今後に残された課題を議論している。

以上のように、本論文の内容は、学術的に意義のある研究であると評価できる。よって、当学位論文審査委員会は、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と判定した。