

制約ネットワークを用いた対話ロボットの制御システムの開発

Control System of Dialogue Robot Using Constraint Network

宮崎庸平*¹

Miyazaki Yohei

今井倫太*¹

Imai Michita

^{*1} 慶應義塾大学理工学部情報工学科

Keio University, Faculty of Science And Technology, Dept. of Information and Computer Science

{miyazaki, michita}@ayu.ics.keio.ac.jp

We propose a new control system for robot using constraint network. In order to achieve smooth communication between robot and human, a robot needs to interpret human behavior correctly and reflect them to its behavior generation. What human behavior means depends on not only their behaviors but also their surrounding environment or their companions' behavior in communication. Moreover, what their companions' behaviors mean depends in the same way. Eventually, human behavior and robot behavior have interdependence each other in Human-Robot communication. Serial processing is ineffective to this kind of problem because interdependent problem can be classified into constraint satisfaction problem. We propose to use constraint network for behavior generation of robot in communication with human. Constraint network is an effective method to solve interdependent problems, since it can determine human behaviors' interpretation and robot behavior generation at the same time. We demonstrated this system with humanoid robot and confirmed its effectiveness.

1. はじめに

人間とロボット間で親密なコミュニケーションを実現するためには、様々なセンサ情報をロボットの動作に利用することが重要である。しかしながら、センサ情報の意味は複数の解釈が可能であり、行動の解釈の多義性によりセンサ情報の処理において弊害が生じる。特に人間は、様々な意図の元で行動するので、センサから得た人間の行動の解釈は、同じ行動であっても自ずと多義的なものとなる。例えば、人間の手を振るジェスチャは、誰かとの別れの時も、友達を見つけて気づいて欲しくて合図するときも同じジェスチャがあらわれるため、システムが正しい解釈をすることは難しい。

そこで本稿は、人間とロボットのコミュニケーションにおいて、センサ情報をもとに得られた人間の行動のデータに含まれる多義性に対してどのようにロボットの行動を決定するべきかについて検討する。人間とロボットのコミュニケーションで重要となる人間の行動には、視線やジェスチャ、体の姿勢や立ち位置といったものが挙げられる。本稿では、特にコミュニケーションにおける人間の視線の多義性を対象とした。

人間とコミュニケーションするロボットを制御する場合において、視線の解釈の多義性を解消するためには、人の視線とロボットの行動の関係を考慮すると同時に、ロボットの動作自体が、人間の視線の解釈結果に応じて動くといった処理の相互依存性を解決する必要がある。つまり、人間の行動はコミュニケーション相手の行動や周りの状況によって解釈が決定されるので、人間とコミュニケーションをとるロボットはロボット自身の行動と人間の行動の解釈を同時に処理する必要があるということである。

しかしながら、単純にセンサ情報を条件分岐で処理する設計方法では、相互に依存した情報解釈を扱うのに限界がある。な

ぜなら、条件が相互依存している場合、行動解釈と行動生成は、それぞれの条件から最適解が決定されるので、条件分岐での処理は不向きであるからである。

ここで、システムと環境を区別しない設計方法として、制約を用いることが考えられる。制約は逐次的な処理とは異なり、処理の順序を捨象した設計法であり、制約充足問題に対して有効な手法である。また、制約の変数同士をネットワークでつないだ制約ネットワークによる推論が提案されている[橋田 93]。

本稿では、制約ネットワークを用いることによって、ロボットがとる行動と人間の視線の解釈との依存関係を同時に解消する方法を提案する。条件分岐による逐次的な手続き処理と異なり、環境情報の取得、ロボットの動作、制約ネットワーク上での推論を並列に処理することにより、環境の情報とロボット自身の行動を同時に処理し、さらに、人間の行動の変化や状況の変化も即時制約ネットワークに反映されるので、レスポンスな行動生成が可能となる。

2. 視線運動からの意図推定

人間の視線運動から人間の意図を推定し、ロボットが支援する研究がなされている[小川原 05]。この研究では視線運動の履歴とユーザのとりうる次の動作から事後確率が最大になるようなユーザの行動をユーザの次の行動として推定し、ロボットが人間のタスクの支援を行う(図1)。しかし、これは固定された環境であるため、利用できる状況が限定されている上に、人間とロボットのコミュニケーションにおいては、ロボットが人間の行動に影響を与えるため、人間の意図推定にロボット自身の行動を考慮する必要性が生じる。



図 1: 人間の意図推定の従来研究

連絡先：宮崎庸平, 慶應義塾大学理工学部,

miyazaki@ayu.ics.keio.ac.jp

3. 制約ネットワーク

3.1. 制約ネットワークの概要

制約は節の集まりであり、節はリテラルの排他的選言であり、リテラルは符号がついた要素制約である。個々の要素制約同士が単一化可能である場合、それらを重み付きの結線をつなぐと、制約はネットワークとして考える事ができる[橋田 93]。このような制約の変数同士をネットワーク状に繋いだものは制約ネットワークと呼ばれる。制約ネットワークによる情報処理は明示的な条件分岐を用いてシステムの動作を決定する逐次処理と異なり、各要素制約がどれほど事実と違反しているかを活性値という値を設定することで判定する。また、制約ネットワーク上で推論を行うために、要素制約同士の結線に重み付けをし、結線を通して活性値の伝搬、つまり演繹やアブダクションを行う。以降の節で、活性値や制約ネットワーク上の推論の方法の詳細を記述する。

3.2. 節の記述

制約ネットワークは、一階述語論理で表現された節の集まりで表現される。節内の記述は 以下のような符号付きの要素制約の OR 集合で行う。

+happy(X) -haveMoney(X).

+の符号は肯定、-の符号は否定を表すので、この節は、

happy(X) \vee \neg haveMoney(X)

を表し。

haveMoney(X) \Rightarrow happy(X)

と等価である。つまり、この節は「X がお金を持っているならば、X は幸せである」という意味を表す。

3.3. 活性値の導入

実環境では、明確に真偽で表すのが好ましくない情報がでてくる。例えば、「A と B の距離が近い」という命題があったとき、一般的には、ある閾値を定めるか、ほかの命題からの推論から真偽が決定される。しかし、すべての命題を真か偽で決定してしまうと、その命題を他の命題の真偽の判断に用いて推論を行っていく際、徐々に現実との齟齬が大きくなり、非常に大雑把な推論しか行うことしかできない。ここで、制約ネットワークでは要素制約に違反度を与えるために活性値という 0 から 1 の実数値を定義する。活性値が 1 に近いということは、実環境に対して、その制約の違反度が低いことを意味し、0 に近いということは違反度が高いことを意味する。この活性値の変化を定義した制約全体のエネルギーが低くなる、つまり各要素制約が実環境に対して妥当な違反度になるように活性値を制約ネットワーク上で伝搬させ、最適に収束させる。

3.4. 単一化

制約ネットワーク上の節間における要素制約同士を繋ぐ結線表現するために、単一化を導入する。単一化は同一の述語であり、かつ真となる共通の集合を持っている要素制約同士でなされる。以下、二つの節間での単一化の例を挙げる。

- (a) +happy(X) -haveMoney(X).
- (b) +generous(Y) -happy(Y).

このような二つの節があったとき、(a) 節の +happy(X) と (b) 節の -happy(Y) との間での 単一化が考えられる。このとき、+happy(X) の X と -happy(Y) の Y が同じ部分集合を包含しているとき単一化が起こる。例えば、

- X = {Mary, Tom, Jack}.
- Y = {Mary, Tom, Bob}.

だとすると X と Y は {Mary, Tom} という同じ部分集合を持つので、単一化が起こる。単一化が起こると、制約ネットワーク上で二つの要素制約の間で結線が作られ、活性値の伝搬が起こり、互いに影響を及ぼす。

4. システムの提案

逐次的な処理は、センサ情報から人間の行動の解釈を推定し、人間行動の解釈から、ロボットの行動を生成するという手順で処理する。しかし、人間の行動の解釈がロボットの行動を考慮していないので、これらにおける相互依存性を扱うことは難しい。一方で、制約ネットワークを用いた手法では、実環境における人間の行動とシステムの行動を等価なものを見なし、人間の行動の解釈とシステムの行動生成を制約ネットワーク上で同時に処理し、これらを決定することで、人間の行動の解釈とロボットの行動生成が共に、より環境と整合性を持つようになると考えられる。図 2 はシステムの概略を表している。

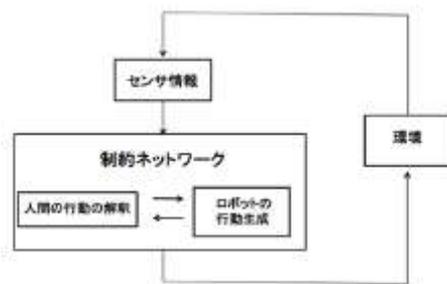


図 2: システムの概略

本研究では、制約ネットワークによる推論を制約充足アルゴリズムとして、人間の視線の多義性を人間の制約ネットワーク上でロボットの行動生成と同時に処理することによって解決するシステムを提案する。

5. 実装

5.1. システム構成

本システムは主として 3 つのモジュールからなる、人の視線を推定するアイトラッキングモジュール、制約ネットワーク上で人間の行動とシステムの行動を同時に処理する推論モジュール、システムの行動を決定する行動生成モジュールである。これらを、スレッドで並列処理を行うことで、人間の行動の変化が、即時制約ネットワーク上の推論に反映され、レスポンスな行動生成が可能となる。図 3 は本システムのシステム構成図である。

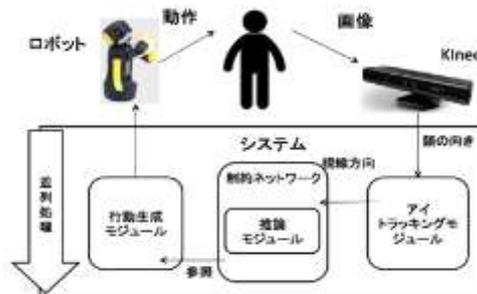


図 3: システム構成図

5.2. 視線の推定

人の視線を推定する為に Kinect のフェイストラッキングを用いた。フェイストラッキングで得られる顔の回転角は pitch, roll, yaw の 3 種類あるが、今回は yaw のみを用いた。人間がどの方向を向いているかの *Direction* は r を yaw の回転角, T を閾値として、本研究におけるアイトラッキングモジュールでは以下の 3 つの値に分類している。

$$Direction = \begin{cases} right(r > T) \\ front(-T \leq r \leq T) \\ left(r < -T) \end{cases} \quad (1)$$

5.3. 制約ネットワーク上での推論

5.3.1. 制約ネットワークの生成

まず、システムは節郡を記述したファイルと要素制約同士の重み付けを記述したファイルから、データを読み出し、制約ネットワークを生成する。図 4 は節内のそれぞれの要素制約における動作主体を表している。

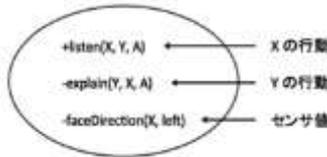


図 4: 節の構造

5.3.2. 節内での要素制約の相互関係

制約ネットワーク内で、人間の行動解釈とロボットの行動生成の相互依存性を表現するために、それぞれを同一の節内で記述する。節は複数のリテラルの OR 集合で表現する。リテラルは、要素制約に符号をつけたものであり、符号の+は肯定、-は否定を表す。また、ロボットの行動生成を担う節を true 節と呼ぶことにする。制約ネットワークでのロボットの行動生成は、この true 節を仮説として、全体の制約がどれほど、仮説と無矛盾であるかでロボットの行動を決定する。図 5 は節内での要素制約同士の結線を表したものである。この結線は単一化結線ではなく、節内の論理関係を表した結線である。

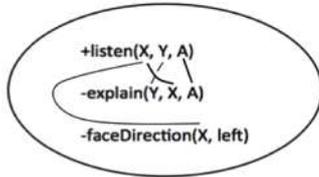


図 5: 節内の結線

5.3.3. 節間での要素制約の相互関係

節間での単一化結線上の伝搬は+のリテラルから-のリテラルへ起こる。図 6 は節間の単一化結線を記述したものであり、

+explain(X,Y,A), +explain(X,Y,R)と-explain(X,Y,B)の間で単一化が起こり、単一化結線が生成されている状態を表す。

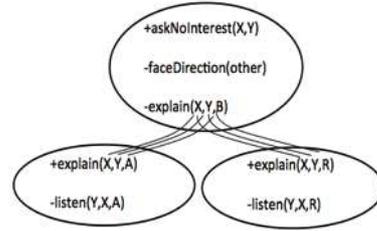


図 6: 節間の単一化結線

5.3.4. 活性値の決定

制約ネットワーク上の要素制約は「+の符号を持つ要素制約」、「-の符号を持つ要素制約」、センサ情報から直接影響を受ける「入力制約」、true 節内のロボットの行動を決定する「行動制約」の 4 種類に分類した。以下に 4 つの要素制約の活性値の決定方法を説明する。

要素制約 c_n の活性値を x_n , c_n につながる節内の結線で繋がっている要素制約の集合を P , 節間の単一化による、単一化結線で繋がっている要素制約の集合を M , 入力制約の集合を I , 行動制約と結線を持つ+リテラルの集合を U_+ , -リテラルの集合を U_- とする。ある要素制約 c と c_p 間の結線の重みを w_p とすると、+の符号を持つ要素制約は

$$x_+ = \sum_{c_p \in P} w_p (1 - x_p), \quad (2)$$

c と c_m ($c \in M$) 間の結線の重みを w_m とすると-の符号を持つ要素制約は

$$x_- = \sum_{c_m \in M} w_m (1 - x_m), \quad (3)$$

また、入力制約の活性値 x_i の総和つまり、人間がどの方向を向いているかに関する値の総和は 1 とするので

$$\sum_{c_i \in I} x_i = 1, \quad (4)$$

行動制約の活性値は単一化結線で繋がっている要素制約から求められ、

$$x_b = \sum_{c_p \in U_+} w_p x_p + \sum_{c_m \in U_-} w_m (1 - x_m) \quad (5)$$

と表す。

5.4. ロボットの行動生成

システムは各 true 節で最も高い活性値をもつ行動を選択する。この際、システムの行動に関連した 2 つの閾値を設定する。一つは、行動開始の閾値であり、もう一つは行動中断の閾値である。前者の閾値を超えると、システムはその動作を開始するが、一度行動を開始すると、行動開始の閾値を下回ってもシステムは行動を継続する。しかしながら、発話中に 発話継続の閾値を下回ると、発話を中断する。また、ある行動が実行中のとき、ほかの true 節の活性値がシステム開始の閾値を上回ってかつ、現

在の行動に対応する true 節の活性値 が発話継続の閾値を下回ると、行動が切り替わる。

6. 動作検証

システムの動作検証のため、ロボットが商品の説明をする例題を用いて、動作の検証を行った。図 7 は動作検証における、左、正面、右を表している。図 7 のように、人間から見て左側に商品、正面にロボットを配置し、右側には何も置かなかった。



図 7:動作環境

6.1. 発話のパターン

システムは制約ネットワーク内の true 節の活性値に応じて、以下の 4 種類の発話を選択する。

- 人間がロボットに注目しているとき、自己紹介をする。
- 人間が商品に注目しているとき、商品の説明をする。
- ロボットが商品の説明、もしくは自己紹介をしている状態で人間が、そっぽを向いたとき、ロボットの話を聞くよう注意する。
- ロボットが商品の説明、もしくは自己紹介をしていない状態で人間が、そっぽを向いたとき、人間に呼びかける。

6.2. 検証項目

以下の 4 つの例題でネットワーク上の推論を確認する。

例題 1: ロボットが自己紹介をしている状態で、人間がよそ見をする。

例題 2: ロボットが商品の説明をしている状態で、人間がよそ見をする。

例題 3: ロボットが商品の説明をしている状態で、人間の視線がロボットに移る。

例題 4: はじめからよそ見している状態である。

これらの例題からシステムの動作について、以下の 2 つの事柄を検証する。

- ロボットが人間に話しかけている状態から人間がそっぽを向く、例題 1、例題 2 とロボットが人間に話しかけていない状態でロボットがそっぽを向いている人間を見

つけた、例題 4 でロボットの人間に対しての話しかけが変わるか検証する。

- 例題 3 において、人間の注目が変わったとき、ロボットが適切に発話を変えるという、一般的な商品説明をするロボットで可能な行動ができるか確認する

7. 考察

4 つの例題により、2 つの検証項目について、以下のことが確認された。

- 例題 1、例題 2 と例題 4 の間でロボットの人間への話しかけが異なる。
- 例題 3 において、人間の視線の変化に応じて話しかけが変わる。

前者は、人間が同じよそ見の動作をしているときでも、ロボットが人間に話をしているときと、話をしていない時で異なる動作をすることを示唆しており、人間の行動とロボットの行動の相互依存関係の一例を解決したことを示している。後者は、人間の動作に応じてシステムが動作を変えることができることを示唆している。

8. 今後の課題

本稿では本システムをロボットの制御に用いたが、本システムをインタラクションの分析に利用することが考えられる。ロボットの制御では、ネットワークが複雑になるにつれて、行動が頻繁に切り替わってしまうことが考えられる。一方、人間とロボットの間でどのようなインタラクションが起こっているか分析するだけならば、ロボットの制御と異なり、実世界へ影響を与えないので、コミュニケーションロボットで利用することが可能であると考えられる。本システムで人間とロボットのインタラクションの分析をし、その分析結果をロボット制御の一情報として扱うことによって、ロボットの行動生成に大きく寄与する情報となり得る。

9. まとめ

本研究では、人間とロボットのコミュニケーションにおける人間の行動解釈の多義性を解消した、制約ネットワークによるロボット行動生成システムを構築した。システムは環境情報の取得、人間の行動解釈、ロボットの行動生成を制約ネットワーク上で同時に処理することで、人間の行動解釈とロボットの行動生成の相互依存性を解決した。本研究ではシステムの動作確認を行い、ロボットの状況に適した動作が生成されることを確認した。

参考文献

- [橋田 93] 橋田 浩一, 宮田 高志, 長尾 確: 力学に基づく分散論理推論. SWoPP'93 (1993), pp75-84.
- [小川原 05] 小川原 光一, 崎田 健二, 池内 克史: 視線運動からの動作意図の推定とロボットによる協調行動への応用, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2005-CVIM-150, pp.55-62, Sep. 2005. (東京)