

引き込み現象に基づく 人間とロボットの暗黙情報のコミュニケーション

Human-Robot Communication of Tacit Information based on Entrainment

小笠原 嘉靖*¹
OGASAWARA Yoshiyasu

田島 敬士*¹
TAJIMA Takashi

畠山 誠*¹
HATAKEYAMA Makoto

西田 豊明*²
NISHIDA Toyoaki

*¹ 東京大学大学院 情報理工学系研究科 電子情報学専攻

Department of Information and Communication Engineering,
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

*² 京都大学大学院 情報学研究科 知能情報学専攻

Department of Intelligence Science and Technology, Graduate School of Informatics, Kyoto University

In this study, we propose two methods for communication of tacit information based on entrainment.

First one is the way to design of the flow of human-robot communication using bayesian networks. It makes the process of establishing the communication robust. Second one is the interface using the synchronization in dynamics system. Human can communicate intention to robot effectively with this interface.

1. はじめに

1.1 本研究の背景と目的

近年、コンピュータ技術の発展により、ロボットが我々の身近な場で活躍するようになってきた。また、それに伴い、ロボットの持つ機能も複雑で、多様なものとなりつつある。その複雑化したロボットの機能を引き出すためには、人間がロボットに伝える意図も複雑で高度なものが必要となる。そのため、人間-ロボット間のコミュニケーションが重要な問題となっている。

特に、言葉などに明示的にあらわれない、暗黙的な情報をロボットが認識することは重要である。明示的な方法で意図を提示するには、その方法を人間が覚える必要があり、ロボットの機能が多くなるほど人間の負担が大きくなってしまいう問題が発生する。そのため、人間のしぐさ等にあられる暗黙情報も考慮して、コミュニケーションを繰り返す過程で人間の意図を正しく推定していく必要があるのである。

人間の暗黙情報をコミュニケーションする方法として、本研究では、「引き込み」という現象に注目する。引き込み現象とは、二つのものの動作リズムが、両者の関係によって決定されるループへと徐々に収束していくことを指す。引き込み現象が実現されているシステムでは、多少の状況の変化があってもそのループに引き込まれるため安定性が高い。またそのループを変化させることで両者の動作を変化させることも可能である。引き込み現象は人間の脳内における認知プロセスにもあらわれているとされており、より人間らしい、高度な振る舞いをロボットに実現するのに有効な考え方の一つといえるだろう。

本研究は、引き込み現象を用いて、暗黙情報を含めた意図を円滑にコミュニケーションすることを目的とする。本研究では引き込み現象を2つのアプローチで用いている。

一つは、定められた適切なコミュニケーションの流れに、自然と人間が引き込まれるようにすることを目指すアプローチである。コミュニケーションが開始されていない状態から、イン

タラクションを繰り返すことで、人間の意図を推定し、ふさわしいコミュニケーションの流れへと人間を引き込む。

もう一つは、引き込みをインタラクションの手段として用いるアプローチである。人間の繰り返しの動作から軌道抽出して、それをロボットの動作に対応させ、その軌道を徐々に変化させることで意図を相互に伝達する。

1.2 本研究の成果

コミュニケーションの流れに対する引き込みについては、ベイジアンネットワークによる確率的なアルゴリズムを用いて実装し、ヒューマノイドロボットによってコミュニケーションの開始の実験を行った。その結果、ノイズや動作の順序に影響を受けにくく、コミュニケーションを開始、維持しやすいことが示された。

引き込みを用いたインタラクション手法については、力学系のアトラクタを人間の繰り返し動作から構築することによって実装した。シミュレータによる実験の結果、効率良く人間の意図を伝達できることが示された。

2. インタラクションスキーマによるコミュニケーションの場の構築

2.1 コミュニケーションの場の構築

従来のロボットと人間のコミュニケーションの研究の多くは、すでにコミュニケーションの目的を双方が理解している状態を前提としている。これは、いわば「コミュニケーションの場」がすでに構築されている状態だといえる。しかし、現実世界においては、コミュニケーションの目的は多様であり、コミュニケーションが開始されていない状態を前提としなければならぬ。

コミュニケーションが行われていない状態では、会話などのバーバル情報から人間の意図を知ることはできない。よってロボットは、人間のノンバーバル情報に含まれる暗黙情報を利用して、インタラクションのループによって意図を推定する必要がある。このループへの引き込みによって、コミュニケーションの場が構築されるのである。

本研究では、コミュニケーションの場の構築の例として、パーティ会場におけるウェイトロボットとのインタラクション行動

を考える。ウェイターは、人間同士の会話を邪魔しないようにしながら、注文の受け付け、電話の取り次ぎなどのタスクを実現するためにコミュニケーションを開始することが要求される。これは他者や周囲の状況を考慮しながら目的を果たすという、社会的なインタラクションであるといえる。この問題に関する議論は、他の社会的なロボットにも適用できる部分が多いと考えられる。

ロボットのコミュニケーション行動のためのオントロジー [畠山 02] によれば、ウェイターロボットにおけるコミュニケーションの開始に必要な情報としては、以下の3つがあげられる。

- 対人距離
- 視線情報
- ACK(確認動作:手を挙げる、頷きなど)

2.2 インタラクションスキーマ

インタラクションスキーマ [畠山 04] は、人間とロボットの典型的な動作の対応づけを記述したものである。このスキーマに従ってロボットは人間の意図や周囲の状況を推定し、反応動作を決定する。また、スキーマをシーケンスとして並べることによって、コミュニケーションの流れをデザインする。状況や目的にあわせて適切にスキーマが遷移するようにデザインすることで、インタラクションループが構成され、コミュニケーションの場を構築できる。

インタラクションスキーマは、ベイジアンネットワーク [Russel 97] によって表現している。ベイジアンネットワークを用いることで、ノイズを含む不完全なセンサ情報からでも、確率推論により、次に遷移すべきスキーマを確率的に決定することができる。これによって、想定していたシーケンスに引き込んでいく、頑健なインタラクションが実現できる。また、シーケンスとして想定していない動作を人間が取った場合には、他のシーケンスのスキーマを含めて遷移確率を計算する。これによって、インタラクションの順番の入れ替わり、意図の解釈の誤解、人間側の心変わりといった、予めシーケンスとしてデザインしにくい問題にも対応することができる。

ウェイターロボットにおけるインタラクションスキーマは、図1のような構成になる。前節で述べた3つの要素に加えて、インタラクションループを構成するために現在のロボットの行動と、それまでの人間とロボットの行動の履歴が情報として必要になる。また、コミュニケーションが開始された後、注文などの意図を伝えるために、ジェスチャによる表象動作の認識も要素として導入する。

2.3 ヒューマノイドロボットへの実装

前節で提案したインタラクションスキーマを用いて、ウェイターロボットのコミュニケーション開始のシーケンスを設計、実装した。ロボットは、ヒューマノイドロボットであるROBOVIEを用いた。ユーザからの入力デバイスとしては、モーションキャプチャによる位置入力(頭、両手、グラス)を用いた。

コミュニケーションのタスクとしては、以下の4つを考慮することにした。おかわりの意図は空のグラスを挙げる表象動作で伝える。グラスを下げる意図はグラスを遠ざけるような表象動作で伝える。

- 飲み物を注文する
- 飲み物をおかわりする
- グラスを下げる

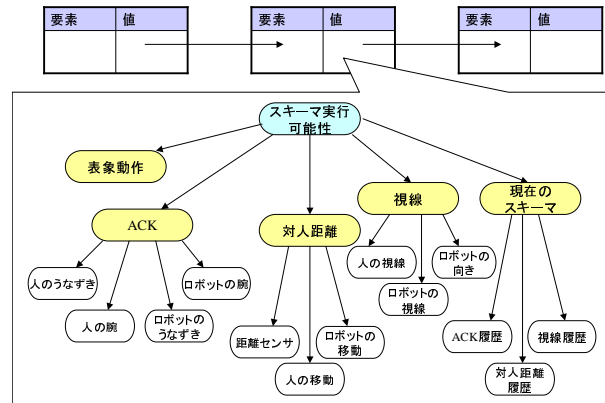


図1: インタラクションスキーマ

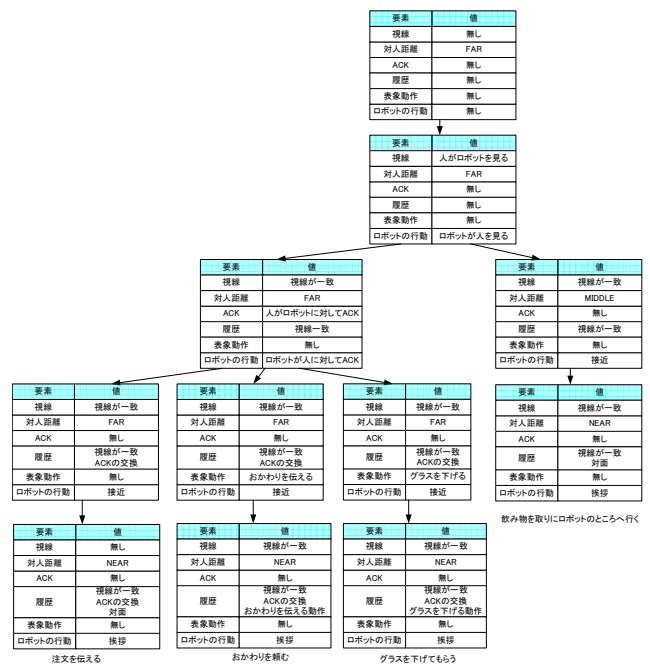


図2: インタラクションスキーマによるシーケンス

- ロボットの所に飲み物を取りに行く

以上のタスクに基づいて設計されたインタラクションスキーマのシーケンスを図2に示す。このシーケンスは、次のような、人間同士の一般的なコミュニケーション開始の手順を想定して設計されている。

1. コミュニケーション相手の同定(視線一致)
2. 遠距離でのあいさつ
3. 接近
4. コミュニケーションの開始

2.4 実験結果

コミュニケーションを有効に開始できるかどうかを示すため、次の4つの条件の間で、ユーザの意図通りのコミュニケーションを開始できたかの比較実験を行った。

表 1: コミュニケーションの開始の実験結果

実験条件	成功回数	試行回数
シーケンス通り	37	40
順番の入れ換え	18	20
途中で意図を変更	12	20
途中で動作を終了	9	20

- シーケンス通りの動作
- シーケンスの順番を入れ換え
- 途中で意図を変更 (人間の気が変わった)
- 途中で動作を終了 (開始しなくなかった)

実験の結果を表 1 に示す。

シーケンス通りの順番で動作を行った場合、また順番のみを入れ換えた場合については、高い精度で意図通りのコミュニケーションが開始できた。このことにより、本手法を用いることで、設計時にインタラクションの手順を厳密に考慮しなくても頑健にコミュニケーションの場を構築できるといえる。

それに対し、人間が意図を途中で変更したり、動作をやめてしまった場合については、ロボットはあまり対応できなかった。意図伝達に失敗した原因は、主に表象動作の種類と、その開始タイミングを誤認識したことであった。

表象動作の表現方法は個人差が大きいと考えられる。ウェイターは複数のユーザを相手にしなければならないため、認識のパラメータを予め決めておくことは難しい。誤認識を減らすためには、学習によってベイジアンネットワークのパラメータを決定し、各ユーザに適応するアルゴリズムが必要となるであろう。

3. 力学系を利用したエントレインメント指向インタラクション

3.1 力学系の引き込み現象と同調・変調

力学系とは、状態変化が微分方程式で表現されるシステムのことである。この微分方程式を適切に定義することで、アトラクタと呼ばれるループ状の軌道へ収束するような力学系を構成することができる。このような力学系は、システムのどの位置から動作を開始してもアトラクタへと引き込まれ (entrainment)、軌道を描くようになる。また、アトラクタからのずれも、自動的に修正される。

本研究では、この力学系のアトラクタの考え方を、人間 - ロボット間インタラクションの手段として用いることを考える。ノイズや入力のばらつきの影響を低減し、引き込み現象をスムーズに実現できることが期待される。

本研究で提案するエントレインメント指向インタラクション [田島 04] を図 3 に示す。人間の繰り返し動作からアトラクタを生成し、ロボットの繰り返し動作をマッピング関数により対応させる。これによって人間の動作とロボットの動作が「同調」する。ここから人間が繰り返し動作を少し変化させると、マッピング関数の係数が変化することによって力学系が変形する、この結果、ロボットの動作も少し変化し、「変調」が実現される。このインタラクションにおいて、同調は大まかな意図の伝達、変調は同調によって決まった意図の詳細化の役割を持っている。

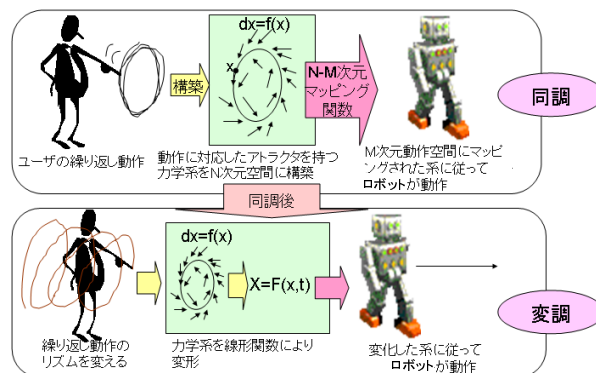


図 3: エントレインメント指向インタラクション

3.2 同調・変調のアルゴリズム

アトラクタを持つ力学系は、モーションキャプチャによる繰り返し動作の入力から、次のような手順で作成する。このアトラクタをロボットの繰り返し動作に対応させることで、同調が実現される。

1. 2次元平面への投影、直流成分の除去、正規化
2. 自己相関関数による周期の抽出
3. ローパスフィルタによる軌道の低周波成分 (アトラクタ) の抽出
4. 多項式表現法 [OKADA 02] による力学系の作成

多項式表現法による力学系は、以下の式で定義される。dy についても同様である。また、 (x_m, y_m) は、その点に最も近いアトラクタ上の点とする。

- アトラクタ上の点の場合

$$dx = x(t+1) - x(t)$$

- アトラクタの近く (原点より一定距離内) の点の場合

$$dx = x_m(t+1) - x_m(t) + a l^2 \{x_m(t) - x(t)\}$$

$$l = \sqrt{\{x_m(t) - x(t)\}^2 + \{y_m(t) - y(t)\}^2} \text{ と規定し、}$$

$$dx = \sum_{n=0}^N \sum_{p+q=n} a_{pq} x^p y^q \quad (N=5) \text{ の } a_{pq} \text{ を最小二乗法で決定}$$

- アトラクタから遠く (原点から一定距離以上) の点の場合

$$dx = -kx \quad (k \text{ は定数})$$

ロボットの動作は、ロボットの現在位置などの内部状態をアトラクタの力学系に逆写像し、微分方程式によって微小時間後の力学系上での値を求める。それをマッピング関数によってロボットの内部状態に戻し、ロボットを動作させる。

変調は、ロボットの動作計算における、マッピング関数の係数を変化させることにより実現する。そのため、マッピング関数は、アプリケーションに応じて、変調により変化させたい要素を考慮して設計する。アトラクタと入力軌道の差が一定以上するとき、次の処理を行うことで動作を変調する。

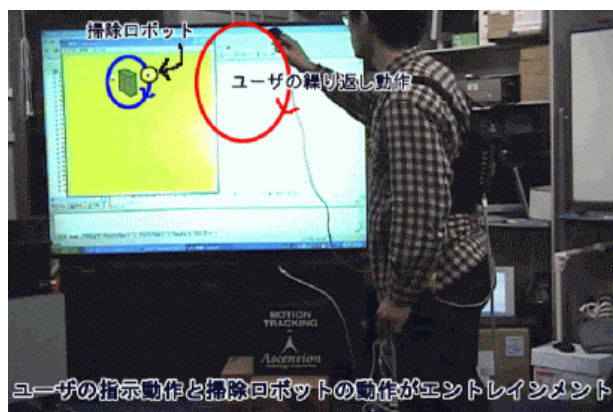


図 4: 掃除ロボットシミュレーション

1. 平面への投影、直流成分の除去、正規化
2. 自己相関関数による周期の抽出
3. 現在のアトラクタに対する位相、周期の差の補正
4. 最小二乗法により写像関数の係数を計算、変更

3.3 掃除ロボットシミュレーション

本手法の有効性を評価するため、掃除ロボットのシミュレーションシステム(図4)を作成した。

掃除ロボットは、部屋(ウィンドウ)内の汚れ(黄色の部分)を掃除し、できるだけ早く部屋全体を汚れのない状態にすることが目的となる。また、部屋には障害物として家具が存在する。

提案手法では、ユーザは掃除ロボットの移動軌道を、モーションキャプチャを用いて手の繰り返し動作で入力する(同調)。その後、軌道やリズムが少し異なる繰り返し動作を入力することで、ロボットの動作軌道を修正する(変調)。変調に関しては、以下の4つの機能をマッピング関数に実装した。

- 軌道を渦巻状に変形
- 軌道の形を微調整
- 軌跡を描きながら位置を移動
- 軌跡の位置の調整

また、家具などの障害物への対応をいちいち人間が指示するのは面倒である。そのため、障害物を回避する、障害物に沿って一周する、障害物で反射する、汚れがひどい方向に向かうといった、自律機能モジュールもあわせて実装した。

3.4 実験結果

他の既存の掃除ロボットアルゴリズムと、掃除完了までの所要時間を比較した実験結果を図5に示す。提案手法は自律機能モジュールのみを用いる場合よりも大幅に所要時間を短縮し、リモコンですべて指示するよりも指示時間が少なくてすむことが示されている。提案手法は、小さなユーザ負担でユーザの意図を効率良く伝えることができたといえる。また、家具を増加させる、家具を移動させる、ロボットの数を増加させるといった環境の変化に対しても強いという結果が得られた。

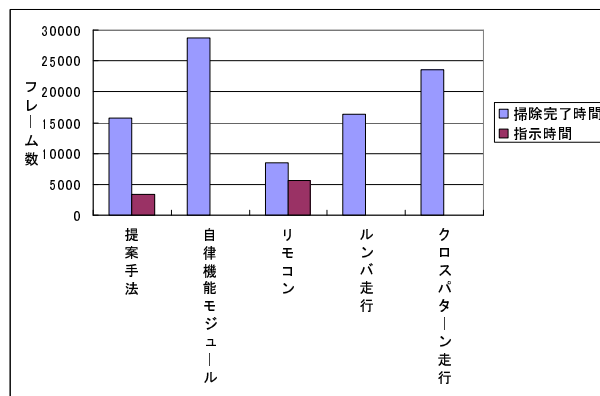


図 5: アルゴリズム間の掃除完了時間の比較

4. おわりに

本研究では、コミュニケーションの流れのデザインと、インタラクションの手法という2つのアプローチで、引き込み現象を用いることを提案した。また、実験を通して、前者についてはウェイトロボットのコミュニケーションの開始、後者については2次元空間でのロボットへの動作指示という、ある程度の範囲において、手法の有効性が示された。

今後は、応用範囲を広げるため、より高度なロボットとのコミュニケーションを問題として引き込みを考えていきたい。現在検討している問題は、人間がロボットに知識を教える、というコミュニケーションである。このコミュニケーションを、教え方として望ましい流れ・方法へ引き込む。その過程を撮影することで、人間の知識をうまく表現した映像コンテンツの作成支援ができるのではないかと考えている。

また、本研究での提案手法は特定のユーザを対象としており、多数のユーザが利用した場合には個人差の問題が発生すると予想される。手法の応用範囲を広げるには、ユーザへの適応の要素を導入することも重要な課題となるといえる。

参考文献

- [OKADA 02] OKADA, M., TATANI, K., and NAKAMURA, Y.: Polynomial Design of Nonlinear Dynamics for the Brain-Like Information Processing of Whole Body Motion, in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2002)*, Vol. 2, pp. 1410-1415, Washington D.C., U.S.A. (2002)
- [Russel 97] Russel, S. and Norvig, P. eds.: エージェントアプローチ人工知能, 共立出版 (1997)
- [田島 04] 田島 敬士: シンボルマッピングとエンブレインメントによる人間とエージェントの暗黙的な意図のコミュニケーション, 東京大学大学院情報理工学系研究科修士論文 (2004)
- [畠山 02] 畠山 誠, 西田 豊明: ロボットによる身体動作表現を用いたコミュニケーションの実現, 第16回人工知能学会全国大会, 1D1-04 (2002)
- [畠山 04] 畠山 誠: インタラクションスキーマに基づいた人間とロボットのインタラクション, 東京大学大学院情報理工学系研究科修士論文 (2004)