

# 「間の合う」人とロボット

## 情報理工学院 情報工学系 三宅 美博 研究室

みやけ よしひろ  
三宅 美博 教授 1959年香川県生まれ。東京大学大学院  
薬学系研究科博士課程修了。1996年、大学院総合理工学  
研究科知能システム科学専攻助教授、2012年、同教授。  
2016年、同大学情報理工学院情報工学系教授。



三宅研究室は、共創システムをキーワードに、人と人、あるいは人と機械のコミュニケーションの仕組みの研究や応用を行なっている。以下では、先生がどのようなアプローチで研究を行なっているのか、またそれに情報工学がどのような形で関わっているのかということについて触れていく。

### コミュニケーションを情報工学する

情報工学系は、コンピュータの原理、プログラムの設計方法、人工知能、そしてそれらを応用したシステムについて研究する系である。

その情報工学系で、一見関係なさそうなコミュニケーション科学というテーマで研究している研究室がある。本稿で紹介する三宅研究室である。

なぜコンピュータに関する研究が中心となっている情報工学系で、コミュニケーション科学の研究が行なわれているのか。実は、コミュニケーション科学と情報工学は、それを実践する段階において高い親和性をもっているからである。その鍵となるアプローチが共創システムというものである。

### 共創システム

そもそも、共創システムとはなんだろうか。ここで例を考えてみる。例えばサッカーにおいて、

ボールをパスすることを考える。ある選手がチームメイトにボールをパスをする際、選手はストップウォッチやメジャーを持ち、時間を合わせてパスをしていない。しかし、なぜかスムーズにボールがわたる。キャッチボールにおいても、相手から投げられたボールをキャッチする際、ボールが到着する時刻の予測が少しでもずれてしまえばたちまち顔面などにぶつかってしまう。しかし実際には計測機器を用いずともうまくキャッチできる。いうならば、「間が合う」のだ。

こうした現象に対して先生は人(の心、脳)には主観的時間や空間の形があり、それが共有され揃うことによって、サッカーやキャッチボールなどの行為が可能になると考えた。

当たり前のように行われているが、これは技術的にはかなり高度なことをやっている。なぜなら、主観的時間は当然人によって異なり、さらに言えば、同じ人であっても時と場合によって同じ時間が長く感じたり、あるいは短く感じたりすること

が起きうるからだ。これが色や質感といった、より主観的で数値で表すと複雑になるような要素になると、その共有を正確に行うことは不可能に等しい。しかし我々は日々、主観的時間や空間を合わせる営みを行っている。この主観的な時間や距離が合うことを、先生は間が合うと呼び、またその営みをお互いに行う仕組みを共創システムと呼ぶ。これを科学的に分析しようと試みているのだ。

しかし、主観的な時間を科学的、技術的に分析する事ができるのだろうか。そもそも、主観的時間などは文字どおり主観的なものであり、客観的な立場から計測することは難しい。この問題を克服するため、まず先生は以下のような実験を行なった。被験者にヘッドホンをしてもらい、ヘッドホンに一定のテンポで音を送る。そして被験者には音の聞こえるタイミングでボタンを押してもらった。この実験の結果は下のグラフのようになった(図1)。このグラフを見てみると、被験者は実際には音がでる少し前にボタンを押していることがわかる。

なぜこのような結果になったのか。もし物理的に耳に音が伝わった時にボタンを押しているのならば、人間の信号伝達などが原因でラグが生じ、音の出る後にボタンが押されているはずである。

これは予測である、と考える人も多いだろう。人間は行動を起こそうとしてから実際に行動を起こすまでにはラグがあるということを経験的に学習していると考えられる。そのため、そのラグを回避するために、実際に音が鳴ると考えられるタイミングを予測し、その前に行動を起こそうとするという考えは自然である。ただ、被験者はその

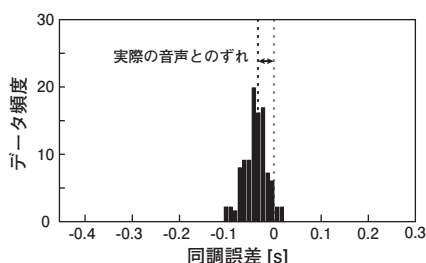


図1 被験者のボタン押しのタイミングのずれ

被験者のボタンを押すタイミングが実際に音がなるタイミングより早い時、誤差は負の値を取る。

ように意識はしていない。あくまで音がなったと考えるタイミングでボタンを押している。つまり、我々は実際の現象とは別に、脳の中で音を「知覚」しているのだ。

この現象は、止まっているエスカレータや動く歩道に乗ることを思い浮かべるとわかりやすい。実際に乗ってみると、足場が動かないことに違和感を感じるだろう。我々はエスカレータの足場は動くものと自然と身につけており、エスカレータに乗るとき、足場の動きを予測し、体に生じるであろう感覚をすでに知覚している。しかしその知覚と反して実際にはエスカレータは動かないため、予測によって作り出された主観的な知覚と実際に知覚される内容にずれが生じる。ここに、人は違和感を生じてしまうのだ。

ここで、先ほどの実験において実際に音がなる時間を客観的時間、人が頭の中でボタンを押す処理を行う時間を、その人が音がなると考える主観的時間として考える。すると、その差からその人の主観的時間と客観的時間とのずれを測る事ができる。2人の間が合うという現象についても、「このずれの度合いが2人でどれほど一致しているか」という指標を用いて定量的に評価できるのだ。

## 人と人との共創システム

さて、間が合うことを客観的に評価できるようになったということは、それを適切に利用し統計をとることで、間の合わせ方を数理的なモデルで表現することができるということを意味する。先生はこれを踏まえた上で、コミュニケーションの諸現象への科学的な理解に取り組んでいる。ここでは、2つの内容について見てみよう。

### ■ テンポ合わせ

先ほどの実験の被験者を2人(それぞれAさんとBさんと呼ぶ)に増やし、2人の間を仕切りで仕切る。Aさんがボタンを押すと、Bさんの耳に音が聞こえる。それに合わせて今度はBさんがボタンを押すと、Aさんの耳に音が聞こえる(図2)。

この操作を繰り返していくと、だんだんとボタンを押すテンポが揃ってくる。ここで、Aさんの

ボタン押しのタイミングは、Bさんにとっては音刺激のタイミングであるから、それぞれの主観的時間と客観的時間とのずれの度合いが、どのように移り変わっていくのかを調べることで、二人がどのようにお互いのずれを調整しているのかがわかる。

先生はこの実験から、二人がお互いにタイミングを合わせる過程についての数学的なモデルを考察した。これについて見ていこう。

コミュニケーションに限らず、同期現象を記述する数学的なモデルに、蔵本モデルというものがある。蔵本モデルは、振動子という時間によって変化する位相をもつ要素の同期について記述したものである。これによると、2つの振動子の相互作用は、それぞれの位相を $\theta_1$ 、 $\theta_2$ とすると以下の2式で表すことができる。

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 + K_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{式1})$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2 + K_{21} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{式2})$$

ただし、 $\omega_i$ は振動子 $i$ の固有振動数、 $K$ は相互作用の強さを表す定数である。ここで位相差 $\Delta\theta_{12}$ を

$$\Delta\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2 \quad (\text{式3})$$

振動数差 $\Delta\omega_{12}$ を

$$\Delta\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2 \quad (\text{式4})$$

と定義すると、(式1,2)より $\Delta\theta_{12}$ は

$$\frac{d\Delta\theta_{12}}{dt} = \Delta\omega_{12} - (K_{12} + K_{21}) \sin(\Delta\theta_{12}) \quad (\text{式5})$$

と導ける。

ここで、同期、つまりテンポが揃うということは、テンポのずれ、すなわち振動の位相差 $\Delta\theta_{12}$ が一定になるということである。Aさんが押すタイミングとBさんの押すタイミングは当然ずれるが、そのタイミングが一定になることが「同期した」と言えるだろう。これより $d(\Delta\theta_{12})/dt = 0$ の時にその状態になることがいえ、その条件は(式5)より

$$0 = \Delta\omega_{12} - (K_{12} + K_{21}) \sin(\Delta\theta_{12}) \quad (\text{式6})$$

ここで(式6)の解の存在条件から、

$$|\sin(\Delta\theta_{12})| = \left| \frac{\Delta\omega_{12}}{(K_{12} + K_{21})} \right| \leq 1 \quad (\text{式7})$$

であり、この時の2人の位相差は次のように求められることになる。

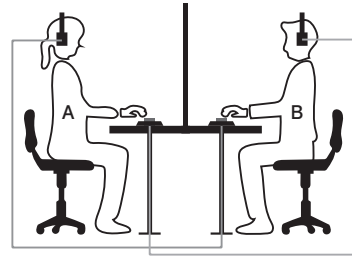


図2 二人の被験者によるボタン押しの実験

被験者の押すボタンと、相手の被験者のヘッドホンは繋がれており、ボタンが押されると一定のテンポ遅れて相手のヘッドホンの音になる。

$$\Delta\theta'_{12} = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta\omega_{12}}{(K_{12} + K_{21})} \right) \quad (\text{式8})$$

さて、蔵本モデルを利用することで、(式7)や(式8)のような条件が得られた。これはどのように解釈すれば良いのだろうか。まず、 $\Delta\omega_{12}$ というのは、2つの振動子、つまり2人の振動数がどれだけ離れているかを意味する。また、 $K_{12}+K_{21}$ は2人の相互作用の強さを表す。(式7)の条件を満たすには、(式7)左辺の分子がより小さいほど、また分母がより大きいほど良い。これは、2人の振動数の差と相互作用の強さを相対的に比較し、後者が大きいほどより同調し、その時の位相差が(式8)のようになるということを意味している。

このようにして、実際の現象と数理モデルがうまく合致することにより、現象を数学的に理解することができる。

## ■ 共感

次に共感という現象について考えてみよう。先生は共感を、自分と相手とのやり取りにおいて、自分の相手に対する動きの予測と実際の動きとがうまく揃うことで行われるものだと考えている。確かに、例えば相手に話をしていて、自分が納得してほしい主張に差し掛かった時、相手から返ってくる頷きが想定どおりだった時とそうでない時では、前者の方が共感を覚えるように思える。そこで、対話中の頷きの周波数とタイミングの位相のずれを、共感の強さで分けて調べた。すると、共感の度合いが大きいと被験者が申告している時は同調の度合いが大きく、さらに、より共感しているほど、相手の頷きが自身のそれよりも早いと

ということがわかったのだ(図3)。最初のボタン押しの実験でもそうであったが、人間は動きが実際に起こると想定されるタイミングよりも少し早く出来事を知覚する。その知覚と実際の動きが合っ  
てはじめて、想定通りの返事が返ってきたと感じ、共感が起こるというわけである。このように、共感の度合いという主観的な現象を領きの周波数と位相の差という客観的な指標を用いて評価できるのだ。

上で述べてきたように、主観的要素を客観的に計測できる要素に落とし込むことで、コミュニケーションに関わる現象に対する科学的と言えるような知見を得ることができる。他にも授業における先生と生徒のやりとりや、広いところでは社会における人々の繋がりといったような人間同士のコミュニケーションをテーマにして、新しい発見が得られると先生は考えている。

### 人と機械の共創システム

こうした人間同士の間を合わせる共創システムの理解は、単なる知的研究だけでは終わらない。それをうまくコンピュータや機械に応用すると、これまで人がやってきた営みを、自然な形でそれらが担うことも可能になる。

その例として、先生が行なってきた歩行補助というテーマを取り上げよう。歩行補助は、リハビ

リテーションや介護などにおいて、一人での歩行が難しい人に何らかの補助を付けてスムーズな歩行を目指すものだが、この補助はセラピストが担うことが多い。これは、人が間の合う補助をすることで、より介護者が自然な動きができ、またセラピストが細やかなフォローができるからである。実際こういったリハビリには効果があると言われている。

先生はこれに着目し、うまく歩行の共創システムのモデルを作り、これを機械や仮想空間に応用することで、この役割を担わせることができるのではないかと考えた。

そこで実際に歩行の実験を行ない間を合わせる数理モデルを作成し、それを搭載した機械が、先生の開発したWALK-MATEである。これまで、歩行補助を機械に任せようとする試みは既にあったのだが、そのやり方はモータを用いて、無理やり足の動きを矯正するものであった。しかし、WALK-MATEはそうではなく、ただ歩行者の歩行のペースをとり、それを数理モデルによって動くバーチャル上の人と与えて、バーチャル上の人  
のペースを実際の歩行者の手や足などに軽い刺激として与える、といったものである。これまでセラピストがやっていた共に歩くという役割だけを担わせたのだ。

機械の仕組み自体は単純なのだが、それでも実際に効果があった。この結果が顕著に表れたのは、パーキンソン病の歩行障害の患者の手にこの装置

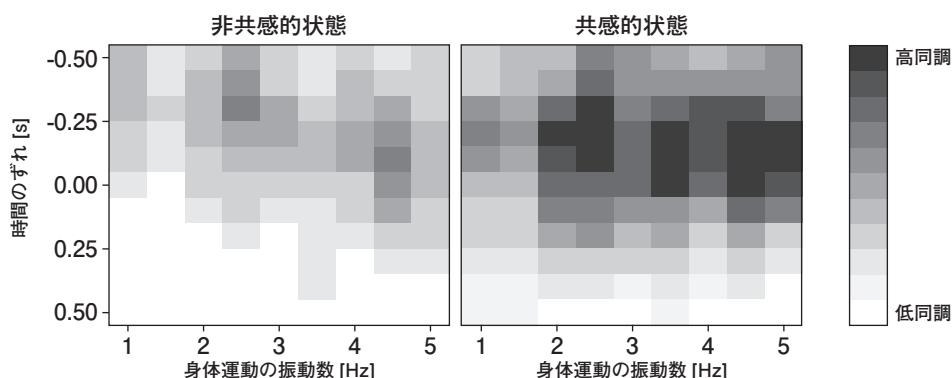


図3 共感と同調の関係性

聞き手の顔きが話し手のそれより早い時、時間のずれの値は負の値を取る。

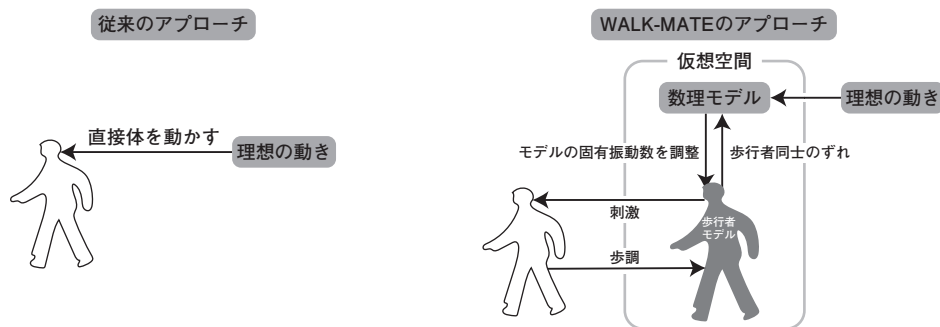


図4 従来およびWALK-MATEの制御システム

従来のシステムは、人間を物理的に理想とされる動きへと、一方向的に動かしていた。それに対しWALK-MATEは、仮想空間上に歩行者のモデルを用意し、その人を間接的に数値モデルで双方向的に制御することで、人と機械との共創を実現している。

を付けてもらった実験においてである。パーキンソン病は神経信号の受け渡しがいまなくなってしまうという障害で、症状として歩行が小刻みになってしまうといったものがある。患者に装置を付けてもらい、手に刺激を与えるだけで、付けてない時に比べて手がよく振れ、足が明らかに上がるようになったのだ。

WALK-MATEの従来とのアプローチの違いは、制御システムの利用法にある（図4）。従来のモータを用いた矯正器は、人間を直接、機械に入力された理想的な歩行の動きで制御するというアプローチをとっていた。しかし、WALK-MATEはそうではない。直接人間を制御するのではなく、人間とバーチャルな空間上の人間のモデルの動きの関係を制御する。そのためモデルの制御は、一方向的なものではなく、今の人間の動きとバーチャルな空間上の人間のモデルの動きの相互作用から生成される関係と理想とする関係に基づいて、バーチャル空間上での人間の動きを調整している。それにより自然な形で人間に歩行を促すことができるのだ。このように、制御する対象を人でなく人と機械の関係にするという発想は、これまでにないアプローチの仕方である。

現在、先生は体への刺激だけでなく、ARを利用することも考えている。仮想空間上の数値モデルの人間をアバターとして自分の前に投影することで、より自然な形でモデルと共創できるということが期待できる。間を合わせる数値モデルの利用により、新しいコンピュータによる制御のあり方ができつつあるのだ。

## 研究のきっかけ

これまで見てきた研究以外にも、三宅先生は様々な分野の知識、アプローチを用いて共創システムの研究を行なっている。そんな三宅先生は、実は薬学部出身である。どうして現在のような研究対象とスタンスが出来てきたのか。

先生はかつては粘菌という原始的な生物の行動の研究を行なっていた。粘菌は多くの細胞からなり、人間の脳や神経にあたる制御器官は存在しない。つまり、粘菌の行動や意思決定の仕組みは従来のシステム論ではうまく説明できない。しかしながら細胞間にはATPのような物質の濃度の振動があり、それが同調することで細胞の動きに統一性が生まれ、結果として個体を維持しているのだ。この仕組みを学んだ時、この仕組みと人間社会のつながりに類似点を見出し、様々な所に応用できるのではないかと考えた。それを結果的に人に応用するようになったのだ。

三宅研究室は、学部生から社会人学生、文系学生、留学生といった様々な世代環境の人々が集う研究室だ。それぞれが自身の興味のあるテーマに取り組みつつ、お互いに議論を交わし、影響されあって成長していく。研究室をも共創の場として、三宅研究室は、日々新しいものを生み出している。

## 執筆者より

お忙しい中、快く研究室を取材させて頂いた事、厚く御礼致します。（小西 優実）