

ロボカップサッカーとジャグリング -計算される日常-

西野順二

電気通信大学 システム工学科

生産機械の発達によって工業生産力が安定し、IT化も一段落した日本において、情報工学とロボティクスを融合したあらたなサービス産業が発達しつつある。介護やエンターテインメントなど、衣食住のみならず生活の質を上げるための多くの技術的な発展が進められている。一方で、人間を含む日常的な活動をシステムとしてみたとき、それらは時変的であり、多変数、非線形性、非確実性など問題解決の対象としてはそもそもモデル化が困難な課題を多く持っている。

本稿では、サッカーを行うサッカーロボットと曲芸のジャグリングというエンターテインメント分野の人間の日常生活に近い対象を取り上げる。そこに含まれる数学・物理的な諸問題と、これまでの成果を紹介し、情報工学と物理的な意味での現実世界との橋渡しを試みたい。

RoboCup soccer and Juggling in computers - daily entertainment computing -

Junji NISHINO

Dept. of Systems engineering
The University of Electro-Communications

In Japan, we have enough industry products to live in ordinary daily life. These days, new kind of services such as entertainments and wellness takes places widely that of heavy material industry. However, human factors include nonlinearity, multi variables and large state space, and uncertainty. In this paper, RoboCup soccer and scientific analysis on juggling are shown as problems that exist very nearly people. Several mathematical models and analysis are shown.

1 はじめに

成熟した日本の産業は、工業中心から情報中心への大きなシフトを経験し、ITという言葉も世間一般に認知されるようになった。携帯電話やインターネットを介した情報機器によるビジネスモデルの革新も日々進み、衣食住という生活に密着した生産物のコストも大きく削減されるようになった。さらに、コンピュータゲームやペットロボットなど生活の質を向上する新たな産業が発達しつつある。

本稿ではサッカーと曲芸という日常生活、とくに余暇生活に関係の深い事柄に対する計算機によるアプローチを紹介する。

2 RoboCup

RoboCupはロボットによるサッカーを主な題材として始まった分散協調システムの標準問題とその競技会である[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]。97年に日本でスタートしてから年々規模を拡大し、対象とする課題もサッカーを始めとして、災害救助ロボット(RoboCup レスキュー)、教育向けプロジェクト開発(RoboCup ジュニア)、家庭用ロボット(RoboCup アットホーム)まで広がっている。参加チーム数はサッカーとレスキューの合計で200を超え、ジュニアだけでさらに300近いチームが加わる。競技関係者は1000名強、展示場などで行われる公開競技には、5万人から10万人程の観客が訪れる。

競技の目的は、開かれた環境における人工知能技術の現実的な応用と評価にある。多数のロボットがしばしば発生するノイズや故障、環境の変化という苛酷な状況に対応しながら、協調するための方法や枠組を総合的に研究することを目標としている。具体的には、周囲の壁を無くしたり自然光を採り入れることで、画像処理の難しさを故意に高くすることなどが行われている。

研究者は、ロボットの認識、行動決定から実際の移動までをトータルに作り上げる必要がある。この厳しさがドライビングフォースとなり、盛んな技術交流とあいまって急激なロボットの能力向上が見られる場となっている。

2.1 サッカーシミュレーションリーグ

サッカーシミュレーションリーグは、コンピュータ内に実現されたバーチャルサッカー場で行われる試合である。統計的あるいは模擬的という意味でのシミュレーションではなく、理解の上ではバーチャルロボットによる「現実の試合」ととらえたほうが実情と近い。ロボットの行動決定については詳細なシミュレーションであり、模擬されるのは試合でなくサッカー場である。

不慮の故障やメンテナンスが不要なため、純粋に知能的な側面の研究が実機に比べて進んでいる。またロボット構築や移送の費用などもほとんどかからないため、現状の国際大会では人間同様に1対1のサッカーを行う唯一のリーグとなっている。チームワークについての技術開発が進み、現在の試合の様子は人間サッカーの試合にも匹敵するほどであり、パスプレーやゴール前でのセンタリングなどを行うことが標準となっている。

バーチャルサッカー場の物理モデルは2次元で始まったが、現在は3次元モデルを主リーグとして、2007年大会現在では2D部門と3D部門の両者が存在する。2Dモデルではボールが頭の上を超えずぶつかることにより、実際のサッカーに比べると遠距離のパスを行えない。このような戦術上の制約があることを3Dモデルでは解消している。また、シミュレーション

の時間モデルも、離散時間同期型から連続時間イベント型に変更されている。3Dのサッカー競技場モデル仕様は現在も開発途上であり、毎年更新と改変が続いている。

筆者は、99年から2005年まで、2D部門にチームおよび運営と研究で参加してきた[10, 11, 12, 13, 14]。ヘテロジーニアスな協調、人間チームとコンピュータチームの対戦の実現や、試合結果に関する考察を行ってきた。以下では2D部門について紹介していくつかの課題を述べる。

2.2 サッカーサーバ

バーチャルサッカーの競技は、ネットワークでつながれた複数のコンピュータによって行う。1台のサッカーサーバと、各チーム用の数台のコンピュータである。バーチャルサッカーロボットはそれぞれ個別のプロセスとして起動され、UDP/IPによりサッカーサーバと接続する。ネットワーク全体で1個のサーバと22のプレイヤーロボット、合計23プロセスが連係して1試合を実現する。各プレイヤープロセスがサッカーサーバ上のバーチャルロボットをそれぞれリモートコントロールしているとみなすことができる。

プレイヤーは、サーバ上のバーチャルロボットの位置と視線方向にもとづいて、環境の視覚情報を一定間隔ごとに受け取る。実際のロボットからの視線を模擬して、コーナーフラグやゴールポスト、ラインなどフィールド上の物体について角度と距離を得ることができる。これらは相対値でありノイズや情報欠損も含むため、認識情報としてカルマンフィルタなどを用いた情報の再構築が必要である。こうした現実世界で発生しうる問題点を、あえてRoboCupでは理想化せずに組み込んでいる。より現実的な人工知能技術の応用を目指しているためである。

バーチャルロボットの運動は、100ミリ秒の時間間隔でサーバに送信する、行動命令によって行われる。移動に関する行動命令は前進と回転だけであり、また1回に受け取れる命令はどちらから1つだけである。行動計画はこの時間的な制約にもとづく必要があり、タイミングを

逸すると行動ができなかったり遅れてしまうため、制限時間内で行動することが必要である。

2.3 サッカーロボットの協調と分散アルゴリズム

サッカーロボットにおける協調問題の解法は、ボールとフィールド空間という共通資源に関するロボット間の分散アルゴリズムとみなすことができる。より一般には、22のロボットとボールの座標の46次元の状態空間から次の行動の決定問題と言える。すなわち、ロボット*i*の行動 U_i の設計とは、 $U_i = f_i(x_1, y_1, x_2, y_2 \dots x_b, y_b)$ となる最適政策関数 $f_i()$ を決定することである。

プレイヤーの意志決定は独立に行われ、互いに未定環境として振舞う。ボールから距離などの評価値が類似した位置にある二つのプレイヤー間で、どちらがボールを取りに行くべきかというリーダー決定の競合解消が発生する。また、相互の認識や行動の時間遅れに起因する不安定な振動および発散の問題がある。これらの総合的な解決をする決定的アルゴリズムは得られておらず、通常はアドホックに構築された局所的に各々の判断を行う規則による作り込みが行われている。

このような局所的判断では、協調の発現による作業空間の拡大と変形が重要である。例えば、ボール運び問題を考える。これはプレイヤーが選択可能な大小のドリブルなどの基本動作を用いてディフェンスプレイヤーの背後にボールとともに回り込む行動である。1対1では元々進行方向側にいるディフェンス側が有利であり、攻撃側がロジカルに勝つ術は無い。しかし、2対1の場合となると、パスという新たな基本動作が生まれる。これによって1対1とは本質的に異なる問題解決が可能となり、確率的に成功率を向上させることができる。

パスのように協調により発現する新たな行動が、問題解決をより巧妙にする可能性が高い。しかし、一般にはどのような新たな行動が可能であるか、という行動生成の問題については明らかではなく、人間プレイヤーがすでに行っている範囲に留まっているのも確かである。

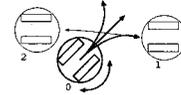


図 1: 非ホロノミックな拘束のある移動ロボット: 0の位置から直接には2の位置へ行けないが1の位置を介して切り返しによって移動できる。

2.4 非ホロノミックな拘束を持つシステムの制御

サッカーロボットの行動モデルは、100ミリ秒おきの離散時間で加わるdashとturnからなる。状態として前進速度を持つ。dashによって加速度が加えられる。回転は現在の方向からの回転角度を直接に指定する。どちらも一定の不確かさを持ち、指定どおりの行動とならず結果には誤差が含まれるため、フィードフォワードによるデッドコントロールはできない。よって精密な動作のためには、常に状態計測を行いつつ適切なフィードバックを行うことが必須である。

ところで、ロボットは平面上の位置 x, y と向き d の3自由度を持つ。これに対して取れる行動は前方へのdashと回転のturnの2入力である。dashとturnのモデルは2輪のタイヤによる移動ロボットと同じく式1に示した横方向への滑べりのない微分拘束をもっている。

$$\dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) = 0 \quad (1)$$

これは非ホロノミックな拘束であり、2入力度3自由度の空間を遷移できる劣駆動系となっている。

非ホロノミックな拘束を持つシステムでは、連続な線形フィードバック制御ができないことが知られており、実際の行動制御側の構築に当たっては様々なアプローチが取られている。従来はサブゴールを設定することによる、フィードフォワードとフィードバックによるヒューリスティックな解決が行われてきた。乗用車の幅寄せ切り返しは一つの例である。最近になって、サブゴールの考えを数学的に一般化した不変マニホールドを構成する方法や、可変拘束制御な

どの方法が提案されている。

回転と前進の行動選択が離散的であることによって、行動の切替え問題も発生する。例えば、自己ロボットを中心として回転運動を行う対象へ追従する場合、方向誤差を0にしてから前進をするアルゴリズムでは、移動に移れず回転するばかりである。制御としては収束しない。このような状況は特殊ではなく、ある程度離れた直線運動するボールも回転運動とみなせることから、ボールをじっと見つめて回転し移動しないロボットとなってしまうことがしばしばある。

対象物の運動 $u(t)$ によって適切な切替え方式が異なるため、一般則はなく厳密な対応には一定時間幅での対象物の運動予測が必要となる。しかし、相手エージェントの行動は本質的に予測不能であり、適当な評価基準を別に定めなければならないのが現状である。

3 ファジィ制御を用いた入門向けサッカーエージェント設計システム OZED

これまで示してきたように、協調するサッカーエージェントを設計・実装するアルゴリズムには未解決の問題も数多くあり、一般に長大な行動記述が必要となる。

サッカーという児童・青少年にも分かりやすい課題であるから、サッカーシミュレーションを教育的な場面で使いたいというニーズがある。しかし、必要なプログラムは長大になり、実用上は大学院生であっても挫折することが多かった。使いやすく性能の良い行動ライブラリが作成・公開され [15]、エージェントを作りやすくなったが大学生程度の予備知識は必要である。

筆者らが開発したバーチャルサッカーロボットキット OZED システム [10, 11] は、図 2 に示すような多次元空間でのファジィ集合を用いた制御系構築手法であり、中学生がバーチャルロボットを作れることを目標としている。グラフィカルなインタフェースにより、基礎となる行動と位置に基づいた条件を組みあわせ、直観的に行動規則を構築することができる。

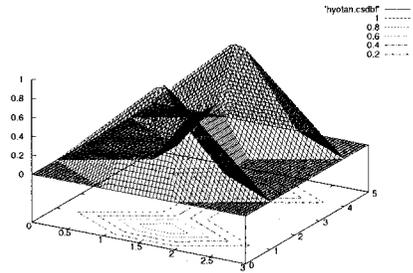


図 2: 多次元空間上のファジィ集合：このへんファジィ

このへんファジィ推論は、ファジィ命題をもちいた並列発火型のルールベース推論である。ルールは以下の形式である。

$$R_i : \text{if } obj_i \text{ is } \tilde{A}_i \text{ then Do Act}_i \quad (2)$$

条件部の $obj_i \text{ is } \tilde{A}_i$ は 2 次元空間上のファジィ命題であり、具体的にはサッカーフィールド上の「このへん」という、主観的かつ直観的に定められたあるあいまいな領域 \tilde{A}_i に、 obj が適合するかについてのファジィ真理値 $[0, 1]$ の値である。

対象 obj は、状態変数 $(X_1 X_2 \dots X_{22} B)$ のうちの一部であり、たとえば ball ならば $B = (B_x B_y) \in R^2$ の 2 変数を指す。あいまいな領域 \tilde{A} への適合度 g は、2 次元上のファジィ集合 \tilde{A} のメンバーシップ関数 $\mu_{\tilde{A}}$ によって求まる。

$$g = \mu_{\tilde{A}}(X), X \in R^2 \quad (3)$$

推論結果の行動 Act_i はあらかじめ定義された基礎動作へのシンボルであり、目的地へ移動、シュート、パスなどがある。

このへんファジィ推論は、並列発火による推論を行う。ファジィ推論では、与えられた状態に対して、複数の規則がそれぞれ $g_i \in [1, 0]$ の範囲の重みを持って適合する。結果の統合は各推論規則 R_i の適合度 g_i をもとに行う。現在の OZED では、最大適合度を与える規則の行動を採択する。

$$Result = \{Act_j | g_j = \max_i(g_i)\} \quad (4)$$

適合度が同じ場合の競合解消は、ルール番号の小さいものをとることとしている。

以上の「このへんファジィ」の開発と採用によって、ユーザの直観を表現する行動エディタを開発することができた。

4 ジャグリング

ジャグリングとは様々な道具を扱って行う曲芸・芸能の一種である。ボールやクラブ(棍棒)をお手玉として投げるトスジャグリングのほか、ディアボロ(中国ゴマ)、デビルスティック、シガーボックスなど様々な道具と技がある。最近では東京都の大道芸人支援事業であるヘブンアーティストライセンス制度の整備によって広場や公園、各種のイベントで見掛ける機会が多くなった。またボールがあれば一人でも手軽に楽しめることから、ニュースポーツとしての愛好家も増加している。

一見複雑なこれらの道具の動きや技それらの組み合わせも、数学的・力学的な法則に従っている。一部の芸人の技からスポーツとなり競技人口が増えた昨今は、動きや技を表現するノーテーションの開発やその分析による新しい技の開発が急激に進んでいる。一部の分野ではコンピュータによるシミュレーションも行われるようになった。

以下では、ジャグリングの物理運動、サイトスワップ、コーザルノーテーションについて紹介する。

4.1 連続時間でのジャグリングの数理

初期のジャグリングの数理的研究では、式(5)に示す飛行時間を連続的に扱ったシャノンの公式[16]が有名である。これは情報理論で有名なシャノンと同一人物である。

$$\frac{f+d}{v+d} = \frac{b}{h} \quad (5)$$

ここで、 f は飛行時間(flight)、 d は保持時間(dwelling)、 v は手が空いている時間(vacant)であり、 b をボールの個数、 h を手の数とし、一定のリズムと高さで投げ続けるものとする。与式

の分母である保持時間と手空き時間を与えることで、飛行時間を求めることができ、結局これはボールの高さを定めることを意味している。また、 $(v+d)^{-1}$ は投げる周期である。周期を変えずに保持時間 d を大きくすると、飛行時間は短くなり低い高さで同じ動作が行えることが導かれる。初心者はキャッチから投げるまでの時間が短い傾向があり、それでは高さが足りずに破綻しやすいことがこの公式から分かる。

4.2 サイトスワップ：離散時間でのジャグリングの数理

ジャグリングの数学としてもっとも発達している事項がサイトスワップである。サイトスワップは一定のリズムの下、異なる高さの投げの組み合わせの実現性について離散化した時間の上で考えたモデルである。

一人でのジャグリングを考える。投げ上げられたボールはそれぞれ空中での滞在を経てキャッチされる。この高さの組み合わせを変えて見栄えが変わり、それぞれ技として認識されている。このボールの高さのシーケンスを数列で表現することができ、これをジャグリングの数列と言う。本来サイトスワップという語は、以下に述べるサイトスワップ操作によって得られるジャグリングの数列の変形法則を指すものであり、数列は単にジャグリング可能な数列と呼ぶのが正しい。慣用的には数列そのものをサイトスワップと呼んでいる。

一定のリズムで左右の手から投げる各時点を経験的な時刻 t として取る。ある時刻 t_i で投げたボールが飛行したのちキャッチされ、再び投げられる時刻を t_j とし、 $at_i=t_j-t_i$ からなる数列をジャグリングの数列と呼ぶ。例えば3カスケードで投げ続けているときの数列は3333...である。同様な数列の繰り返しはその一部を切り出して表現する。この場合3、33などである。この様子は、 $f(t_i)=at_i+t_i=t_j$ という写像で表現することができる。ジャグリング可能でなくドロップするとは、同じ時刻に二つのボールが集まることによってジャグリングできなくなる状態で、 $f(t)$ が全単射でないときに発生する。すなわちある数列 a_i がジャグリング可能

である必要十分条件は $f(t)=at+t$ が全単射の写像になることである。

サイトスワップとは、数列のジャグリング可能性を保存する入れ換え操作である。数列中の a_i と a_j について $i < j$ とし、 $d=j-i; 0$ とする。時間を遡らず実現可能という意味で $a_i-d; 0$ を条件に加えておく。ここで新しい a_i', a_j' を $a_i'=a_j+d, a_j'=a_i-d$ とする操作をサイトスワップと言ひ、ジャグリング可能性が保存される。これは $f(t)$ が全単射であることを保存して $f(i)$ と $f(j)$ を入れ換えたことになることから明らかである。たとえば長さ3のカスケード 333 について2番目と3番目をサイトスワップすると、342 となり、これはジャグリング可能な数列である。

ジャグリング可能な数列では「長さ N の数列の平均はボールの個数 M に等しい」という平均値の法則が成立つ。遷移図においてボール1つを追いかけると定義から各時刻の数値と間隔は等しく、平均値は1となる。よって平均値とボールの数が等しいのは自明である。

平均値の法則から、次の系が導ける。平均が整数でない数列はジャグリング可能でない。

また、ボールの数を b とすると長さ n のジャグリング可能な数列の個数 M は、

$$M = \frac{1}{n} \sum_{d|n} \mu\left(\frac{n}{d}\right) ((b+1)^d - b^d) \quad (6)$$

である。ここで、 $\mu(n)$ はメビウス関数であり n の素因数の個数の偶奇と指数に応じて1,-1,0を取る。これは、グラハム [17] によって示されており、徳重による日本語での詳しい解説 [18] がなされている。

4.3 コーザルノーテーション

コーザルノーテーションとは、2人以上で投げ渡しを行うパッシングの技を記述する図表表現である。2人の場合には手の数が4本となり、投げる道具の数も5~10程度と増えて複雑となる。コーザルノーテーションは道具の遷移図から、一律で1人あたり2を減じて表したものである。つまり3つの道具を二人が持っているときには、それぞれ1本の線、合計2本で

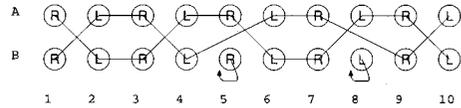


図3: 2人6本パッシングのコーザルノーテーション: ジャグラー A は2回に1度右手から B へ投げている。時刻4で B は左手から高いパスを投げ、時刻7で A が右手から高いパスを投げている。こうした組合せを図で確かめながら作ることができる。

表せることとなり、複雑さを大分減らすことに成功している。しかしながら、道具が10個となればやはり6本の連結線が必要となってしまうが、実用上許容できる範囲である。

5 おわりに

サッカーの試合やジャグリングは「遊び」に分類される生活活動の一部である。脱工業社会にあって新たな社会的価値創造が進み、生産性ではなくこうした生活に密着した課題を解決するニーズも増えている。人間が関与する度合が高まるほどに、対象システムの変数は増え、関係は非線形になり、問題の数学的構造も複雑になる。本稿では一つの技法として、ファジィ集合による多次元空間上での直観表現を支援する「このへんファジィ推論」を用いた OZED によって、人間の知識を利用するという手法を示した。また、ジャグリングのように単なる遊びであっても数理的な解析によって新しい技が開発できたり技術向上の助けとなることを示した。こうした生活に密着した分野での、計算機応用のさらなる発展を目指したい。

参考文献

- [1] A. Breadenfeld, A. Jacoff, I. Noda, and Y. Takahashi, editors. *Robocup 2005 : Robot Soccer World Cup IX*. LNCS. Springer, 2006.
- [2] Daniel Nardi, editor. *Robocup 2004 :*

- Robot Soccer World Cup VIII*. LNCS. Springer, 2005.
- [3] Daniel Polani, B. Browning, A. Bonarini, and K. Yoshida, editors. *Robocup 2003 : Robot Soccer World Cup VII*. LNCS. Springer, 2004.
- [4] Gal A. Kaminka, Pedr U. Lim, and R Rojas, editors. *Robocup 2002 : Robot Soccer World Cup VI*. LNAI. Springer, 2003.
- [5] A. Birk, S. Coradeschi, and S. Tadokoro, editors. *Robocup 2001 : Robot Soccer World Cup V*, volume 2377 of *LNAI*. Springer, 2002.
- [6] P. Stone, T. Balch, and G. Kraetzschmar, editors. *Robocup 2000 : Robot Soccer World Cup IV*, volume 2019 of *LNAI*. Springer, 2001.
- [7] M. Veloso, E. Pagello, and H. Kitano, editors. *Robocup-99: Robot Soccer World Cup III*. Springer, 2000. ISBN 3-540-41043-0.
- [8] M. Asada and H. Kitano, editors. *RoboCup-98: Robot Soccer World Cup II*. Springer, 1999. ISBN 3-540-66320-7.
- [9] H. Kitano, editor. *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*. Springer, 1998. ISBN 3-540-64473-3.
- [10] 西野 順二, 久保 長徳, 下羅 弘樹, and 中島 智晴. 位置に基づく行動規則を実装した入門用サッカーエージェント作成キット ozed. In 第 23 回 SIG-Challenge 研究会講演論文集, pages 19–24. 人工知能学会, 2006.
- [11] 西野 順二, 久保 長徳, 下羅 弘樹, and 中島 智晴. ロボカップサッカーシミュレーションエージェント開発体験キット ozed. In 第 47 回プログラミングシンポジウム報告集, pages 79–86. プログラミングシンポジウム委員会, 情報処理学会, 2006.
- [12] Junji NISHINO. Cooperative behavior of human players in simulated soccer. In *Proceedings of SCIS & ISIS 2004: Joint 2nd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 5th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, pages In CD-ROM, 2004.
- [13] Shinya YODA and Junji NISHINO. an analysis on human midfield soccer player's behavior in simulated soccer field. In *SIG-FAI-A303, JSAI*, pages 39–44, 2004.
- [14] 西野 順二. ドリームチーム oz と人間チーム oz-rp の挑戦. *日本ロボット学会誌*, 20(1):39 – 40, 2002.
- [15] 秋山英久. ロボカップサッカーシミュレーション 2D リーグ必勝ガイド. 秀和システム, 2006.
- [16] C. E. Shannon. Scientific aspects of juggling. In Aaron D. Wyner N. J. A. Sloan, editor, *Claude Elwood Shannon : collected Papers*, pages 850–865. IEEE Press, 1993.
- [17] J. Buhler, D. Eisenbud, R. Graham, and C. Wright. Juggling drops and descents. *American mathematical monthly*, 101:507–519, 1994.
- [18] 徳重典英. ジャグリングの数列. *数学セミナー*, (7):19–23, 1996.