

力学系における2次元的な大きさを考慮した定性推論の検討

5 G-5

阪田知己 平嶋宗 柏原昭博 豊田順一

大阪大学産業科学研究所

1 序論

本研究では、EBS(Error-based simulation)[1]運用の高度化を指向して、力学系における2次元的な大きさを考慮した定性推論について検討する。力学問題における学習者の立式上の誤りを挙動シミュレーション上に反映させたものがEBSであり、誤りの可視化としての有効性はいくつかの事例に対して確認されている。このEBSを運用するためには、生成された挙動が効果的に誤りを可視化しているかどうかを診断する必要がある、現在、QSIM、DQ解析を利用した診断手法を実現している。

しかしながら、この手法では物体の大きさは考慮されていない。1次元空間における単体の運動を対象とした場合にはこのことはそれほど大きな問題とはなっていないが、複数の物体が運動するような場合には、個々の物体の動きだけではなく、物体間の関係が重要になり、物体間の関係が人間にとってどう見えるかを診断する上で、大きさを考慮することは不可欠となる。

物体の大きさを考慮した挙動推定としてForbusらの研究[2]がある。この研究ではまず空間世界における状態記述に関して、貧困仮説(poverty conjecture)と呼ばれる「空間および形状の表現で、特定の問題から独立した一般的で、かつ純粹に定性的なものは存在しない」という仮説を導入した後、いくつかの問題について、問題固有の空間記述を用意し、その状態記述に関する遷移規則を、空間情報に沿って人間がすべて用意したうえで、大きさを持った物体の挙動推定を実現している。

本研究では、Forbusらと同様に問題固有の空間記述を用意した後、その状態記述に関する状態遷移規則を運動方程式により導き、この遷移規則を用いて物体の挙動を推定する。本研究の目的は学習者から与えられた誤りを含んだ運動方程式に基づく物体の振舞いを推論することであり、Forbusらのようにあらかじめ遷移規則を用意しておくことは難しい。そこで、運動方程式から遷移規則を生成する手法を採用している。この手法は運動方程式に基づく物体の挙動を空間世界に写像することという目的においては十分である。

2 定性推論手法

ここでは、まずForbusらの主張に準拠した空間記述について述べ、次に方程式からこの空間記述上での遷移規則の導出について述べる。さらにこの手法に基づいた挙動推定とEBSの解析を具体例を用いて説明する。

2.1 空間世界における状態の記述法

人間が空間世界での物体の状態を認識する際には、物体の配置、および物体間の距離の変化率である物体間の速度が重要となる。本研究では空間記述として、物体の

Toward Qualitative Reasoning for Dynamics of Spatial Objects
Tomoki Sakata
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567, Japan

形状に即した2軸を導入し、その2軸の向きに沿って記述される物体間速度、および同じく2軸の向きに沿って記述される物体間距離を用いて表現される位置関係を導入する。

物体間速度はある軸の向きにおける2物体間の距離の変化率に関する定性的記述であり、2物体間の距離が減少していれば近づく[-]、増大していれば離れる[+]、定常状態ならば静止[0]の定性値をとる。さらに、物体の2次元的な大きさを考慮するため、1物体が他物体の内部で運動する「ずれる」、という状態[S]を導入する。

位置関係とは、2物体の空間的配置を記述するものであり、軸に沿った物体間距離を乖離[+]、接触[0]、重畳[-]の3定性値で定義したものである。軸を設定することにより軸のどちら向きに離れているかも記述される。以上、2つの定性的記述を空間記述として2次元的な大きさを持つ力学系における挙動推定を行う。

2.2 推論規則の導出

運動方程式から空間記述の遷移則を取り出すために、相対速度、相対加速度の概念を用いる。

相対加速度は各物体の絶対加速度をもとに導出できる。相対速度について、本研究ではその定性値[-],[0],[+]のみを扱う。相対加速度を用いて相対速度の定性値の挙動を推定することができる。

相対速度により、ある物体に対してその物体がどの向きに運動しているかを取り出し、さらにその瞬間での位置関係を用いて物体間速度を導出する。また、物体間速度を位置関係の変化率として用いることにより位置関係を推定する。

2.3 挙動推定の具体例

図1に示す系における挙動推定を行う。この系の正しい運動方程式を(1)~(4)で示す。

2.3.1 初期状態の設定

m_1 、 m_2 、 m_3 の位置関係、物体間速度、およびそれぞれの変化傾向の設定を行う。その際運動方程式の立式の方向に沿って、鉛直方向、水平方向の2軸に各物体の挙動を分割して考える。

問題の条件より m_1 と m_2 、 m_1 と m_3 、 m_2 と m_3 、初期状態におけるそれぞれの間の物体間速度 $bv(X,Y)$ はすべて0である。最後尾の矢印はそれぞれ水平左向き、鉛直下向きを正にとることを示す。

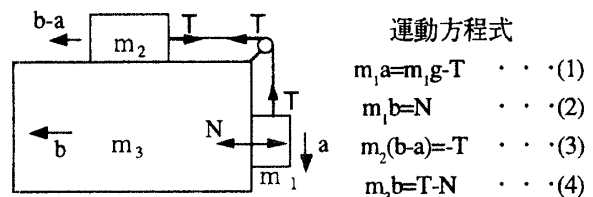


図1：例題

$$\begin{array}{ll} bv(m_1, m_2) \leftarrow : [0] & bv(m_1, m_2) \downarrow : [0] \\ bv(m_1, m_3) \leftarrow : [0] & bv(m_1, m_3) \downarrow : [0] \\ bv(m_2, m_3) \leftarrow : [0] & bv(m_2, m_3) \downarrow : [0] \end{array}$$

次に、鉛直方向、水平方向それぞれの位置関係を設定する。物体間距離 $rp(X, Y) \leftarrow$ は X に対する Y の水平方向の位置を示し、2 物体の配置により図 2 に示す定性値をとる。

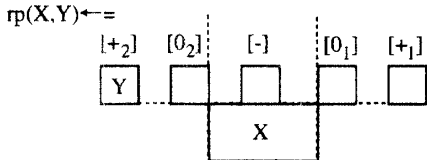


図 2 : 物体間距離の設定

鉛直方向も同様に取り扱う。本問題では図 1 で記述される物体の配置をもとに、以下の値を初期状態にとる。

$$\begin{array}{ll} rp(m_1, m_2) \leftarrow : [+2] & rp(m_1, m_2) \downarrow : [+1] \\ rp(m_1, m_3) \leftarrow : [0_2] & rp(m_1, m_3) \downarrow : [-] \\ rp(m_2, m_3) \leftarrow : [-] & rp(m_2, m_3) \downarrow : [0_2] \end{array}$$

各物体に関する水平方向および鉛直方向の物体間距離の組が位置関係を示す。

さらに、物体間速度に関する設定を行う。図 2 より $rp(X, Y) \leftarrow$ は、相対速度 $rv(X, Y) \leftarrow$ が $[+]$ のとき $[+]$, $[0_1]$, $[-]$, $[0_2]$, $[+2]$ と遷移する。定性値 $[+]$ から $[0]$ への遷移および $[0]$ から $[-]$ への遷移をもたす相対速度の状態を物体間速度 $[-]$ の状態と定義することができる。従って、物体間距離 $rp(X, Y) \leftarrow$ が $[+]$, $[0_1]$ では $rv(X, Y) \leftarrow$ が $[+]$ であるとき物体間速度 $[-]$ とし、 $rp(X, Y) \leftarrow$ が $[0_2]$, $[+2]$ では $rv(X, Y) \leftarrow$ が $[-]$ の状態を物体間速度 $[-]$ とおく。さらに、 $rp(X, Y) \leftarrow$ が $[-]$ の状態では $rv(X, Y) \leftarrow$ が $[+]$, $[-]$ の状態を物体間速度 $[S]$ の状態とおく。

物体間速度は以上のように位置関係、および相対速度から導出されるものであり、位置関係の挙動推定の際にはその値を直接使う必要は必ずしもない。従って、以下位置関係の挙動推定の際には相対速度を用いて推論することにする。これを踏まえて、本問題において、 m_1 と m_2 の位置関係に関する遷移規則は図 3 のようになる。これと同様の処理を m_1 と m_3 、および m_2 と m_3 の間にも行い同様の遷移規則を得る。

$$(X, Y) = (rp(m_1, m_2) \leftarrow, rp(m_1, m_2) \downarrow)$$

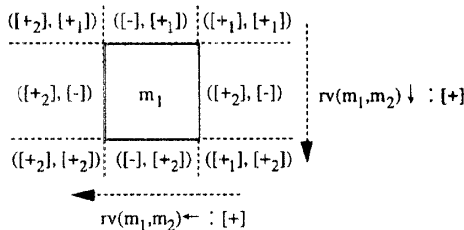


図 3 : 推論規則の導出

さらに、推論規則として瞬間状態から区間への遷移は、区間から瞬間への遷移に優先すると仮定する。本問題における瞬間は定性値 $[0]$ を含む状態がその定性値の変化率として $[0]$ 以外の値を持つ状態である。つまり、 $[0]$ からの遷移は $[+]$, $[-]$ からの遷移に優先して起こる。

2.3.2 正答時の挙動推定

各物体の絶対加速度 $aa(X)$ を運動方程式より得る。

$$\begin{array}{ll} aa(m_1) \leftarrow : b & aa(m_1) \downarrow : a \\ aa(m_2) \leftarrow : b-a & aa(m_2) \downarrow : 0 \\ aa(m_3) \leftarrow : b & aa(m_3) \downarrow : 0 \end{array}$$

絶対加速度をもとに相対加速度 $ra(X, Y)$ を求める。

$$\begin{array}{ll} ra(m_1, m_2) \leftarrow : b-a-b=-a & ra(m_1, m_2) \downarrow : 0-a=-a \\ ra(m_1, m_3) \leftarrow : b-b=0 & ra(m_1, m_3) \downarrow : 0-a=-a \\ ra(m_2, m_3) \leftarrow : b-(b-a)=a & ra(m_2, m_3) \downarrow : 0 \end{array}$$

相対加速度を相対速度の変化率とみなし、それぞれの相対速度の次状態を得る。

$$\begin{array}{ll} rv(m_1, m_2) \leftarrow : [-] & rv(m_1, m_2) \downarrow : [-] \\ rv(m_1, m_3) \leftarrow : [0] & rv(m_1, m_3) \downarrow : [-] \\ rv(m_2, m_3) \leftarrow : [+] & rv(m_2, m_3) \downarrow : [0] \end{array}$$

相対速度の現状はすべて $[0]$ であったから、物体間距離、すなわち位置関係の次状態は変化しない。

$$\begin{array}{ll} rp(m_1, m_2) \leftarrow : [+2] & rp(m_1, m_2) \downarrow : [+1] \\ rp(m_1, m_3) \leftarrow : [0_2] & rp(m_1, m_3) \downarrow : [-] \\ rp(m_2, m_3) \leftarrow : [-] & rp(m_2, m_3) \downarrow : [0_2] \end{array}$$

位置関係および相対速度より物体間速度の次状態は以下のようにになる。

$$\begin{array}{ll} bv(m_1, m_2) \leftarrow : [-] & bv(m_1, m_2) \downarrow : [+] \\ bv(m_1, m_3) \leftarrow : [0] & bv(m_1, m_3) \downarrow : [S] \\ bv(m_2, m_3) \leftarrow : [S] & bv(m_2, m_3) \downarrow : [0] \end{array}$$

さらに次状態を求める。運動方程式は変化しないので、各物体の絶対加速度、相対加速度は変化しない。従って、相対速度の各値も変化しない。物体間距離の変化率である相対速度は初期状態から変化しているため、位置関係の次状態は変化する。

相対速度と位置関係の変化方向の対応付けをもとに位置関係の次状態を得る。

$$\begin{array}{ll} rp(m_1, m_2) \leftarrow : [+2] \rightarrow [0_2] & rp(m_1, m_2) \downarrow : [+1] \\ rp(m_1, m_3) \leftarrow : [0_2] & rp(m_1, m_3) \downarrow : [-] \rightarrow [0_1] \\ rp(m_2, m_3) \leftarrow : [-] \rightarrow [0_1] & rp(m_2, m_3) \downarrow : [0_2] \end{array}$$

つまり、次状態の候補は $2^3-1=7$ 通り存在する。

2.3.3 誤答時の挙動推定

誤答例として、(2)式が欠落している場合を考える。このとき、 m_1 は水平方向に加速度を持たないと考える。正答時の挙動推定と同様の手順を踏むことにより挙動推定を行った後、正答時の挙動推定結果と比較すると、正答時の挙動推定では現れない $bv(m_1, m_3) \leftarrow : [+]$ 、および $rp(m_1, m_3) \leftarrow : [+2]$ が現れる。このことから EBS は誤りを可視化する上で有効であると判定する。

3 今後の展望

本稿では方程式をもとに空間世界での挙動推定法を提案した。今後は本手法を用いた挙動推定システムの実装、および本手法の適用範囲の確認をし、さらに適用範囲の拡大を目指す予定である。

参考文献

- [1]堀口他: "定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御", 人工知能学会誌, Vol12, No2 (1997) (掲載予定)
- [2]Forbus et al, "Qualitative spatial reasoning: The CLOCK project", Artificial Intelligence, 51 (1991)