

ムービングオブジェクトの速度変化パターンを識別できる類似検索機能の導入

Introduction of a Similarity Search Function of Moving Objects to Capture their Speed-Change Patterns

河内 聡恵[▼] 増永 良文[▲]

Satoe KAWACHI Yoshifumi MASUNAGA

我々は、3次元空間内の物体の動きに関するデータを格納し、様々な問合せを実現するムービングオブジェクトデータベースシステムの構築を進めている。既に、動きに関する問合せ手段として有効な類似検索機能の実現に向けて、ムービングオブジェクトデータに対する類似性が体系的に定義されている。これにより、同じ軌跡を描く動きであっても、その時間的な変化まで類似した動きを検索することができるようになった。しかしながら、人が類似していると判断する一つの大きな要因として考えられる速度変化のパターンを認識することはできなかった。そこで本稿では加速度を考慮することにより類似性の定義を拡張して速度変化のパターンを認識することができるような類似検索機能が提供できることを明らかにする。

Our aim is to construct a moving object database system that enables us to store data about moving objects in the three-dimensional real world and allows us to issue queries for various types of object moves. Several identity and similarity definitions of object moves have been proposed, and by using one of them it became possible to distinguish two object moves that draw the same trajectory but move differently in time. However, it became also clear that the current definitions cannot recognize the differences among speed-change patterns that seem to be a very important factor for human to judge the object move similarity. In this paper, we propose a new similarity measure that captures the difference of speed-change patterns by taking into account the acceleration measure of moving objects.

1. はじめに

近年、人間の動きなどを計測するためのモーションキャプチャリングシステムや、カーナビゲーションシステムなどで用いられるGPS(Global Positioning System)のように、動く物体の位置を計測するためのセンシング技術が発達してきている。そこで、このような計測データをデータベースに蓄

[▼] 学生会員 お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士前期課程 satoe@dblabb.is.ocha.ac.jp

[▲] 正会員 お茶の水女子大学理学部情報科学科 masunaga@is.ocha.ac.jp

え、動きに関する様々な問合せやシミュレーション分析を行いたいという要求が高まってきた。このような要求に応えるためには、空間データと時間データの双方を統合的にデータベース上で扱えるようにするための時空間データモデルが必要となる。

これまでに、我々は動きに関する基本的要素としてオブジェクトの位置情報だけではなく、向き・傾き・形状情報を考慮に入れたムービングオブジェクトデータモデルを提案してきた。そこではドメインリレーショナル論理に基づいた問合せ言語であるMOQL(Moving Object Query Language)を提案し、これによって動きに関する様々な問合せが記述可能となった[1]。さらに、我々がオブジェクトの動きを表現しようとする際、「回転する」「揺れる」のように定義が明確でない言葉を用いることが多い。また、思い描いた動きを言語によって表現するのが困難な場合も往々にしてある。こうした問題に対処するために、動きに関する問合せ手段には言語に依らない検索機能が有効なのではないかと考え、検索したい動きを実際にモーションキャプチャリングシステムを利用して計測し、それをサンプルとして与えることで類似したデータを検索をすることのできる類似検索機能をデータベースシステムに導入することとし、ムービングオブジェクトデータに対する類似性を動きの同一性、基本類似性、部分列類似性、幾何変換類似性、時間変換類似性、時空間変換類似性の6つに分類し定義した。これにより、同じ軌跡を描く動きであっても、その時間的な変化まで類似した動きを検索することができるようになった[2]。

しかし、人が類似していると判断する要因は様々である。上記の類似性に基づいて類似検索を行った結果、人が類似していると判断する一つの大きな要因として考えられる速度の変化パターンを認識することはできなかった。そこで本論文では、速度の変化量を表す加速度を考慮することにより類似性の定義を拡張して、速度変化のパターンを認識することが出来る類似検索機能を提案しそれを検証する。

2. 動きの基本類似性

2.1 動きとは

オブジェクトの動きは、オブジェクトの中心座標・速度・加速度、及びそれに付与された時刻印の4要素で構成される。正式には、周波数 f で時刻 t_s から t_e まで計測されたオブジェクトの動きを $\vec{M} = (\vec{m}_0, \dots, \vec{m}_n)$ で表す。ここに、 $\vec{m}_i = (\vec{p}_i, \vec{v}_i, \vec{a}_i, \vec{t}_i)$ で、要素はそれぞれオブジェクトの位置ベクトル $\vec{p}_i = (\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$ 、速度ベクトル $\vec{v}_i = (\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$ 、加速度ベクトル $\vec{a}_i = (\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$ を表す。また、 $t_s = t_0$ 、 $t_e = t_n (n = (t_e - t_s) \times f)$ である。

2.2 動きの同一性

動きの類似性を求める前に、まずはその基本として動きの同一性の定義を行う。

定義2.1: (動きの同一性)

動き \vec{M}, \vec{M}' が次の条件を満たすとき、2つの動きは同一である。

1. $f = f'$
2. $t_s = t_s' \wedge t_e = t_e'$
3. $(\forall i) \vec{p}_i = \vec{p}_i'$

2.3 動きの要素の基本類似性

動きのデータには、位置・速度・加速度という3つの基本

要素がある．そこで，まずはそれぞれの要素についての類似性を定義した．相違度の距離関数には，一般的によく知られているユークリッド距離を用いる．

定義2.2: (位置の基本類似性)

動き \vec{M} が \vec{M}' に対して以下の条件を満たすとき，位置について -類似している．

1. $f = f'$
2. $t_s = t_s' \wedge t_e = t_e'$

$$3. D_{posi}(\vec{M}, \vec{M}') = \frac{\sum_{i=0}^n d_p(\vec{m}_i, \vec{m}_i')}{n} \leq \varepsilon$$

$$\text{但し } d_p(\vec{m}_i, \vec{m}_i') = |\vec{p}_i - \vec{p}_i'|^2$$

定義2.3: (速度の基本類似性)

動き \vec{M} が \vec{M}' に対して以下の条件を満たすとき，速度について -類似している．

1. $f = f'$
2. $t_s = t_s' \wedge t_e = t_e'$

$$3. D_{velo}(\vec{M}, \vec{M}') = \frac{\sum_{i=0}^n d_v(\vec{m}_i, \vec{m}_i')}{n} \leq \varepsilon$$

$$\text{但し } d_v(\vec{m}_i, \vec{m}_i') = |\vec{v}_i - \vec{v}_i'|^2$$

定義2.4: (加速度の基本類似性)

動き \vec{M} が \vec{M}' に対して以下の条件を満たすとき，加速度について -類似している．

1. $f = f'$
2. $t_s = t_s' \wedge t_e = t_e'$

$$3. D_{acce}(\vec{M}, \vec{M}') = \frac{\sum_{i=0}^n d_a(\vec{m}_i, \vec{m}_i')}{n} \leq \varepsilon$$

$$\text{但し } d_a(\vec{m}_i, \vec{m}_i') = |\vec{a}_i - \vec{a}_i'|^2$$

2.4 類似検索の実験と検証(実験1)

この実験1では模型列車の動きを計測し，基本類似性について検証を行った．具体的には，直径70cmの環状の線路上を列車が次に示すA～Cの3つの走行パターンで10秒間で一周する様子を計測してデータベースへ格納した．

Type A: 等速で進む列車の動き(等速パターン)

Type B: 前半に比べて後半が遅く動く列車の動き(速 - 遅パターン)

Type C: Type B のパターンを2度繰り返す列車の動き(速 - 遅 - 速 - 遅パターン)

データベースに対して，いずれかのTypeに属する動きを一つサンプルとして指定して基本類似性に基づいて検索を行った．その結果，サンプルが属するTypeのデータが必ず上位に検索され，それ以外のものと区別することができた．また，検索結果は各タイプがグループとしてまとまってランキングされた．例えばサンプルがType A の時は，位置と速度に関しては，A, C, B の順で，加速度に関してはA, B, C の順でグルーピングされた．しかしながら，位置と速度に関してA, C, B の順であったことは，計測されたデータを分析したところ，実験データにばらつきがなかったため偶然成立したものであることが判明した．(つまりこの並び順には意味がない)これに対し，加速度は速度の変化量であり，速度が変わる際に著しく変化するため，加速度の相違度に基づく類似検索結果は，速度が変化する回数の少ないType B がType C より常に上位にランキングされると考えられ，速度変化の

パターンを捉えるという観点からは望ましい結果を与えている．しかしながら，本章で与えた基本類似性の定義ではムービングオブジェクトの速度変化パターンの違いを的確に意識することはできないことが判明した．

そこで，次章で速度変化のパターンを捉えることのできる類似性の尺度の導入を検討する．

3. 速度変化を捉えられる類似性

3.1 加速度の変化回数による動きの分割

2.4 節で行った実験1より，加速度は速度が変化するたびに著しく変化するため，速度変化回数を捉えることができることが分かった．そこで，動き \vec{M} において $|\vec{a}_i|$ がある閾値を超えた時区間で最大値をとる時刻 t_i (但し $0 \leq i \leq k$) で動きを $k+1$ 個に分割する(図1)．分割された動きを $\vec{M}_0, \dots, \vec{M}_k$ とする．

定義3.1: (分割された動きの基本類似性)

動き \vec{M}, \vec{M}' が各々 $\vec{M}_0, \dots, \vec{M}_p, \vec{M}_0', \dots, \vec{M}_q'$ に分割されたとき，

$$D_{posi}(\vec{M}, \vec{M}') = D_{posi}(\vec{M}_0, \vec{M}_0') + \dots + D_{posi}(\vec{M}_i, \vec{M}_i') + \dots + D_{posi}(\vec{M}_q, \vec{M}_q')$$

$$D_{velo}(\vec{M}, \vec{M}') = D_{velo}(\vec{M}_0, \vec{M}_0') + \dots + D_{velo}(\vec{M}_i, \vec{M}_i') + \dots + D_{velo}(\vec{M}_q, \vec{M}_q')$$

とする．但し $p \leq q$, $D_{posi}(\vec{M}_i, \vec{M}_i'), D_{velo}(\vec{M}_i, \vec{M}_i')$ はそれぞれ位置の相違度，速度の相違度を表す．

$D_{posi}(\vec{M}_i, \vec{M}_i'), D_{velo}(\vec{M}_i, \vec{M}_i')$ は，一般に計測開始時刻，終了時刻が等しくないため，2.3 節で定義された基本類似性では計算できない．そこで， $D_{posi}(\vec{M}_i, \vec{M}_i'), D_{velo}(\vec{M}_i, \vec{M}_i')$ を以下のように定義しなおす．ここで， $L_i(t), L_i'(t)$ は横軸に時刻 t ，縦軸に移動距離 L をとった $L-t$ グラフの表す式， $v_i(t), v_i'(t)$ は横軸に時刻 t ，縦軸に速度 v をとった $v-t$ グラフの表す式，積分範囲は \vec{M}, \vec{M}' それぞれの開始時刻 $t_s(t_s')$ から終了時刻 $t_e(t_e')$ までとする．

定義3.2: (分割された動きにおける位置の類似性)

動き \vec{M} が \vec{M}' に対して以下の条件を満たすとき，位置について -類似している．

$$D_{posi}(\vec{M}_i, \vec{M}_i') = \left| \int_{t_s}^{t_e} L_i(t) dt - \int_{t_s'}^{t_e'} L_i'(t) dt \right| \leq \varepsilon$$

定義3.3: (分割された動きにおける速度の類似性)

動き \vec{M} が \vec{M}' に対して以下の条件を満たすとき，速度について -類似している．

$$D_{velo}(\vec{M}_i, \vec{M}_i') = \left| \int_{t_s}^{t_e} v_i(t) dt - \int_{t_s'}^{t_e'} v_i'(t) dt \right| \leq \varepsilon$$

ここで， $p \leq q$ であるから，動き \vec{M}_{p+1} 以降は存在しない．そこで，次に示すコスト関数を定義する．

定義3.4: (分割数が異なる場合の類似性)

$p < i \leq q$ に対して，

$$D_{posi}(\vec{M}_i, \vec{M}_i') = D_{velo}(\vec{M}_i, \vec{M}_i') = \infty$$

したがって，定義3.4より速度の変化回数が異なる2つの動きは類似していないと判定することができる．

3.2 位置の相違度と速度の相違度の対応関係

前節で、加速度によって動きを分割し、位置と速度の相違度によって類似性を定義した。ここで、もし位置の相違度と速度の相違度が対応していれば、どちらかの要素のみの相違度で動きの類似性を表すことができる。つまり、次の命題を考える。今後、加速度によって分割された各動きは、ほぼ速度一定であると仮定する。この仮定は、実験1により裏付けられている。このとき、次の命題が成り立つ。

命題 3.1：(位置の相違度と速度の相違度の対応)

サンプルとなる動き \vec{M}_s 、比較される動き $\vec{M}_{d1}, \vec{M}_{d2}$ を与えたとき、次の関係が成り立つ。

$$D_{posi}(\vec{M}_s, \vec{M}_{d1}) \leq D_{posi}(\vec{M}_s, \vec{M}_{d2})$$

$$\text{iff } D_{velo}(\vec{M}_s, \vec{M}_{d1}) \leq D_{velo}(\vec{M}_s, \vec{M}_{d2})$$

ここで、この命題を証明する。サンプルとなる動き \vec{M}_s と比較される動き \vec{M}_d の移動距離を L とする。ここで、2つの場合を考える。

- (1) \vec{M}_s, \vec{M}_d 共に時刻 τ_c で1回速度変化をする場合
- (2) \vec{M}_s, \vec{M}_d がそれぞれ時刻 τ_{cs}, τ_{cd} で1回速度変化をする場合

3.2.1 (1)の場合

\vec{M}_s が速度 v_{s1} で時刻 $\tau_s (=0)$ から τ_c まで距離 L_{s1} 移動し、速度 v_{s2} で時刻 τ_c から τ_e まで距離 L_{s2} 移動したとする。同様に、 \vec{M}_d が速度 v_{d1} で時刻 $\tau_s (=0)$ から τ_c まで距離 L_{d1} 移動し、速度 v_{d2} で時刻 τ_c から τ_e まで距離 L_{d2} 移動したとする。但し、 $L_{s1} + L_{s2} = L_{d1} + L_{d2} = L$ とする(図1)。 $L_{s1} = v_{s1} \times \tau_c$, $L_{s2} = v_{s2} \times (\tau_e - \tau_c)$, $L_{d1} = v_{d1} \times \tau_c$, $L_{d2} = v_{d2} \times (\tau_e - \tau_c)$ であるから、

$$D_{posi}(\vec{M}_s, \vec{M}_d) = \left| \frac{1}{2} \tau_e \times (L_{s1} - L_{d1}) \right| = \left| \frac{1}{2} \tau_e \times \tau_c \times (v_{s1} - v_{d1}) \right|$$

$$D_{velo}(\vec{M}_s, \vec{M}_d) = \left| \tau_c \times (v_{s1} - v_{d1}) \right| + \left| (\tau_e - \tau_c) \times (v_{s2} - v_{d2}) \right|$$

となる。x軸に速度、y軸にそれぞれ $D_{posi}(\vec{M}_s, \vec{M}_d)$, $D_{velo}(\vec{M}_s, \vec{M}_d)$ をとると、両者とも速度 v_{s1} のときに0となるv字型(v_{s1} まで単調減少、その後単調増加)のグラフを描く(図2)。したがって、命題が成り立つ。

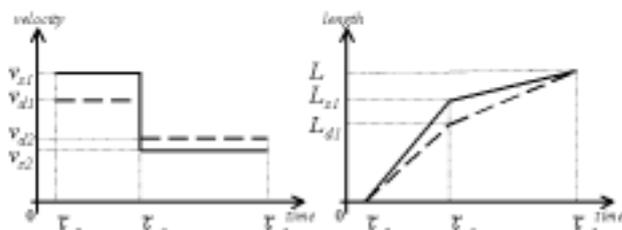


図1 (1)の場合
Fig.1 Case(1)

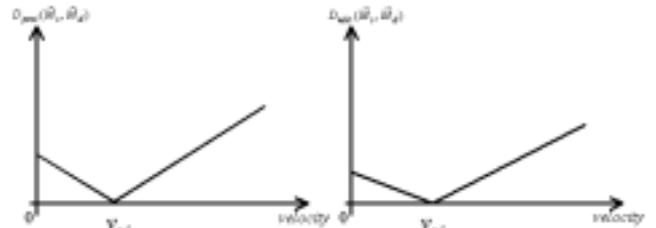


図2 速度と相異度の関係

Fig.2 Relations between Velocity and Dissimilarity

3.2.2 (2)の場合

\vec{M}_s が速度 v_{s1} で時刻 $\tau_s (=0)$ から τ_{sc} まで距離 L_{s1} 移動し、速度 v_{s2} で時刻 τ_{sc} から τ_e まで距離 L_{s2} 移動したとする。同様に、 \vec{M}_d が速度 v_{d1} で時刻 $\tau_s (=0)$ から τ_{dc} まで距離 L_{d1} 移動し、速度 v_{d2} で時刻 τ_{dc} から τ_e まで距離 L_{d2} 移動したとする。但し、 $L_{s1} + L_{s2} = L_{d1} + L_{d2} = L$ とする(図3)。 $L_{s1} = v_{s1} \times \tau_{sc}$, $L_{s2} = v_{s2} \times (\tau_e - \tau_{sc})$, $L_{d1} = v_{d1} \times \tau_{dc}$, $L_{d2} = v_{d2} \times (\tau_e - \tau_{dc})$ であるから、

$$D_{posi}(\vec{M}_s, \vec{M}_d) = \left| \frac{1}{2} (\tau_{sc} \times L_{s1} - \tau_{dc} \times L_{d1}) \right|$$

$$+ \left| \frac{1}{2} ((\tau_e - \tau_{sc}) \times (L_{s1} + L) + (\tau_e - \tau_{dc}) \times (L_{d1} + L)) \right|$$

$$D_{velo}(\vec{M}_s, \vec{M}_d) = \left| \tau_{sc} \times v_{s1} - \tau_{dc} \times v_{d1} \right|$$

$$+ \left| (\tau_e - \tau_{sc}) \times v_{s2} - (\tau_e - \tau_{dc}) \times v_{d1} \right|$$

となる。x軸に時刻、y軸に速度、z軸にそれぞれ $D_{posi}(\vec{M}_s, \vec{M}_d), D_{velo}(\vec{M}_s, \vec{M}_d)$ をとると、両者とも時刻 τ_{sc} , 速度 v_{s1} のときに0となる $z = c - xy$ (c は定数)型のグラフを描く(図4)。したがって、命題3.1が成り立つ。

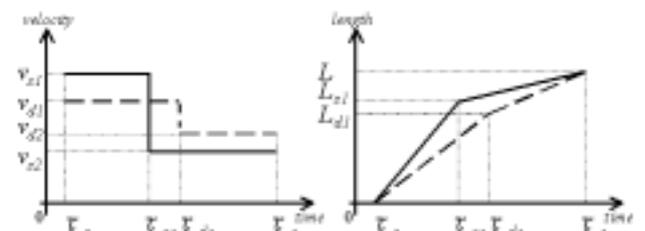


図3 (2)の場合
Fig.3 Case(2)

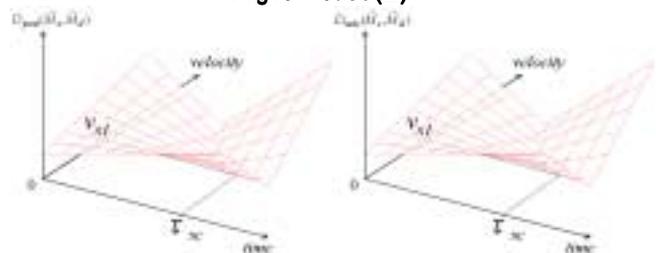


図4 時刻、速度、相異度の関係

Fig.4 Relations among Time, Velocity and Dissimilarity

命題3.1より、位置の相違度が速度の相違度どちらかの要素のみで動きの類似性を表すことができる。ここでは、位置の相違度を用いることにする。

定義3.5: (速度変化パターンを捉える動きの基本類似性)

動き \vec{M} が \vec{M}' に対して以下の条件を満たすとき、動きについて -類似している。

$$D_{move}(\vec{M}_i, \vec{M}'_i) = D_{posi}(\vec{M}_i, \vec{M}'_i) \leq \epsilon$$

3.3 類似検索の実行と検証(実験2と実験3)

本節では、前節で定義した動きの基本類似性に基づいて行った実験2の結果を検証する。

3.3.1 実験2

まず、2.4節で用いた3つのTypeのデータを用いて、新たに定義した定義3.5の類似性に基づいて検索を行った。いずれのTypeをサンプルとして与えた場合でも、他のTypeとは速度変化回数が異なるため、定義3.4により他のTypeの動きはランキング外になり、速度変化パターンが同一のムービングオブジェクト同士のみが類似していると判定された。

しからば、同一の速度変化パターンを有するムービングオブジェクト同士の間でどのような動きの類似性を識別できるのかさらに実験3を行った。

3.3.2 実験3

次に、Type B に属するデータのみを対象に実験を行った。2.4節の実験と同様、直径70cmの環状の線路上を列車が $B_1 \sim B_3$ の3つの走行パターンで10秒間で一周する様子を計測、データベースへ格納した。

Subtype B₁: 計測開始から1秒後に高速から低速に変化する列車の動き。

Subtype B₂: 計測開始から2.5秒後に高速から低速に変化する列車の動き。

Subtype B₃: 計測開始から5秒後に高速から低速に変化する列車の動き。

データベースに対して、いずれかのSubtypeに属する動きを一つ取り上げ、それをサンプルとして指定して基本類似性に基づいて検索を行った。

検索の結果、サンプルに属するSubtypeのデータが必ず上位に検索され、それ以外のものと区別することができた。また、Subtype B₁をサンプルとして与えた場合は、位置の相違度、速度の相違度どちらを用いてもランキングは B_1, B_2, B_3 の順になり、人が類似していると判断する要因の一つである速度変化パターンを認識することができていることが確認できた。

4. まとめと今後の課題

本論文では、動きに対する問合せ手段として、実際にモーションキャプチャリングシステムを利用して検索したい動きを計測し、それをサンプルと指定することで類似した動きのデータを検索する類似検索機能を論じた。「動きが類似している」と一口に言っても、その意味するところは多様であり、速度変化のパターンが似ているというも「動きが類似している」と判断する一つの要因である。しかしながら、これまでに定義された動きの類似性は、各計測時刻における位置の相違度が基準になっていたが、それでは速度変化のパターンを認識することはできなかった。そこで、速度変化のパターンを判断することができる類似検索機能を提供するために、新たな動きの類似性を定義・導入した。

まず、速度や速度の変化量である加速度を動きの要素に追

加し、各要素の類似性を新たに定義した。実際に、模型列車の動きを計測してデータを格納し、検索を行った結果を検証したところ、位置と速度の類似性は偶然性を排除できない結果になるが、加速度は速度の変化回数を捉えることができることがわかった。そこで、加速度の著しく変化する時刻で動きを分割し、位置と速度の相違度によって類似性を判断する新たな動きの類似性を定義した。このとき、位置の相違度と速度の相違度には対応関係があり、どちらか一方の相違度のみを用いて動きの類似性を表すことができることを示した。

実際に検索を行ったところ、速度の変化回数の異なる動きは全く別の動きとして判断された。また、同じ速度の変化回数でも、速度の変化する時刻が異なる動きの方が違う動きとして判断された。つまり、速度変化のパターンを認識することができた。

今後の課題としては、大きく2つの項目が挙げられる。1点目は、動きの類似性の拡張である。類似性とは、アプリケーションによって様々に定義されるものである。ある動きに対して、その鏡像にあたる動きも似ていると判断する基準の一つと考えられる。また、オブジェクト間の関係についての類似性も考えられる。例えば、「オブジェクト間の距離関係がおおよそ似ているシーンを検索する」といった問合せである。これらを考慮に入れて、新たな類似性を定義していく必要がある。2点目は、索引付けである。時系列データは一般にそのデータサイズが大きくなり、これに対して圧縮及び索引付けを行う研究は既に多くなされている。しかし、データの圧縮とその圧縮したデータを利用した検索では、検索の精度が劣化することがあるため、ムービングオブジェクトデータに対する類似検索としてある一定の精度を保ったまま効率的に検索する方法を検討していく必要がある。

[文献]

- [1] Y. Masunaga, N. Ukai: "Toward a 3D Moving Object Data Model - A Preliminary Consideration -", in Proceedings of the 1999 International Symposium on Database Applications in Non-Traditional Environments, Kyoto, pp.306-316 (1999).
- [2] 水崎 聡子, 増永 良文: "ムービングオブジェクトデータベースシステムのための類似検索機能の実現に向けて," 情報処理学会第125回データベースシステム研究会報告, Vol.2001, No.70, pp. 217-223, (2001).

河内 聡恵 Satoe KAWACHI

2003 お茶の水女子大学大学院人間文化研究科博士前期課程修了(2003年4月(株)野村総合研究所入社)。2001 お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業。ムービングオブジェクトデータベースシステムの研究・開発に従事。日本データベース学会学生会員。

増永 良文 Yoshifumi MASUNAGA

お茶の水女子大学理学部情報科学科教授。1970 東北大学大学院工学研究科博士課程修了, 工学博士。データベースシステムの研究・開発に従事。情報処理学会データベースシステム研究会主査, ACM SIGMOD 日本支部長, 情報処理学会監事などを歴任。情報処理学会フェロー。電子情報通信学会フェロー。日本データベース学会副会長。著書に「リレーションアルデータベース入門 [新訂版]」(サイエンス社), 監訳書に「オブジェクト指向データベース入門」(Won Kim 著, 共立出版)など。