

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500101

研究課題名（和文） グラフィックスハードウェアの形状処理への応用に関する研究

研究課題名（英文） Study on Application of Graphics Hardware for Geometric Processing

研究代表者

床井 浩平（TOKOI KOHE）

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：70188746

研究成果の概要（和文）：近年のグラフィックスハードウェアの特徴である高度な並列演算機能とプログラム可能性を形状処理に効果的に応用するための、対象の粒子によるモデル化手法の開発を行った。また、グラフィックスハードウェアの中心的な構成要素であるラスタライザを形状処理における干渉問題に応用する手法の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：A modeling method was developed with the particle of the object to apply an advanced parallel processing function and the programmability that are the feature of the modern graphics hardware to the geometric processing effectively. Moreover, a technique for applying the rasterizer that was a center component of the graphics hardware to the interference problem in the geometric processing was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2010年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：グラフィックス

1. 研究開始当初の背景

コンピュータの画面表示に対する高精細化や高速化の要求に応えるために、現在のコンピュータのグラフィックスハードウェアには強力な実数演算機能が搭載されている。さらに近年は画面表示に対する多様な要求を満たすために、プログラム可能なグラフィックスハードウェアが一般的となった。これにより、グラフィックスハードウェアは画面上に図形表示を行うだけでなく、一般的な数値計算のためのアクセラレータとして応用することが可能になった。

しかし、このようなグラフィックスハードウェアの構造はグラフィックス処理の性能向上のために最適化されたものであるため、問題をグラフィックスハードウェアが得意とするグラフィックス処理の枠組みの中でモデル化できなければ、本来の性能を十分に発揮することができない。

また近年のグラフィックスハードウェアは、搭載する大量のメモリを集中的に利用して様々な処理を行う。したがって処理速度の向上はこのメモリの帯域幅の拡大に依存する。これはグラフィックスハードウェアのこ

ストを増大させる要因となる。また最近のグラフィックスハードウェアは、高度な陰影付けを行うために、複雑な処理を画素単位に実行する機能をもつ。これは1画素あたりの処理時間の増大を招く。このため、この種のグラフィックスハードウェアでは演算器（ピクセル処理ハードウェア）を並列化し、複数の画素の同時処理によって高速化を図っている。これは更にメモリの帯域幅を要求する。

、このようにして得られた画素のデータが必ずしも画面表示に反映されるわけではない。表示画面の大きさ（あるいはメモリ量）は一定であるから、表示形状が複雑になりデータ量が増えると、表示されずに捨てられるデータも増大する。すなわち、このようなグラフィックスハードウェアでは有限のメモリに対して大量のデータを流入させることに努力が払われているが、そのデータの大半は画面表示に寄与することなく捨てられてしまうということが発生している。したがって、この効率化には演算器資源の利用の最適化が重要になる。

2. 研究の目的

グラフィックスハードウェアの強力な実数演算能力は、集積された多数の並列演算器によってもたらされる。しかし、この構造はグラフィックス処理自体が内包する並列性に対して最適化されたものであり、一般的な問題に対してこの並列性を最大限に活用するための方法論は、現時点では確立されていない。このため、対象とする問題がグラフィックス処理の枠組み内でうまくモデル化できなければ、この演算器資源は有効に活用されず、グラフィックスハードウェア本来の能力を十分に引き出すことができない。

形状処理においてもグラフィックスハードウェアを応用することで、処理時間の短縮や対話性の向上などが見込まれる。しかし、既に述べたように、形状処理を一般的な問題として取り扱うことは、グラフィックスハードウェアの演算器資源の利用の最適化の点で有効ではない。

そこで本研究では、形状処理にグラフィックスハードウェアを応用する際の演算器資源の利用の最適化を図る手法の確立を目的として、処理対象の粒子によるモデル化手法の開発を行う。また、これに加えて、グラフィックスハードウェアの中心的な構成要素であるラスタライザを応用した形状処理手法の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) グラフィックスハードウェアを用いた積雪形状の算出

グラフィックスハードウェアにより実行される隠面消去処理や影付け処理（シャドウ

イング）は、物体同士の干渉処理である。これらはラスタライザを中心にして実現されている。これらの機能を一般的な形状処理における干渉問題に応用すれば、形状処理の対話性を大幅に向上できる。そこで本研究では、これらの機能を活用してリアルタイムに積雪形状を求める手法を開発する。

申請者はこれまでに積雪形状の高速なモデリング手法を提案している。これは降雪と遮蔽物との干渉検出に影付け処理の手法を導入することによって、この干渉検出を効率的に行うとともに、グラフィックスハードウェアの隠面消去処理機能を活用した高速化を達成している。

しかし、現在の実装では積雪量の積算処理や粒子堆積モデルを用いた積雪形状の安定化処理をホストコンピュータ側で実行しているため、ホストコンピュータとグラフィックスハードウェア間のデータ転送がボトルネックとなっている。

そこで本研究では、これを可能な限りグラフィックスハードウェア上で実行する手法を開発する。

- 積雪量の積算にはグラフィックスハードウェアの機能であるアキュムレーションバッファを用いる。
- また粒子堆積モデルを用いた積雪形状の安定化処理はグラフィックスハードウェアのピクセル処理ハードウェアにより実行し、結果をグラフィックスハードウェア上のテクスチャメモリに得る。
- そして最終的な積雪景観の表示を行う際には、このテクスチャを用いてポリゴンを変形し、もとのシーンと合成する。これにも最近のグラフィックスハードウェアの機能である変位マッピング機能を用いる。

以上により、ホストコンピュータ側からグラフィックスハードウェアへのデータ転送を最小限にとどめることができる。

(2) 着衣形状のモデリングの隠面消去処理を応用した高速化

人体と着衣との干渉検出については、初年度の成果である積雪形状のモデリング手法を踏襲する。申請者らは既にこの手法をもとにした布の干渉検出手法を開発している。本研究ではこれを一般的な人体への着衣形状に拡張する。

着衣形状を布の人体に対する包絡形状としてモデル化することにより、基本的な着衣形状を生成する。積雪形状のモデリングでは、降雪方向の不規則さや遮蔽物の影響を考慮するために、シーンを複数の方向に投影して、シーン中の各部の雪の到達確率を求めている。人体の場合もこれと同様に、複数の方向への投影像を求めることによって、布と人体との干渉位置の検出を行うことができる。

(3) 粒子ベースの変形シミュレーション

本研究は (1) の積雪形状の算出手法および (2) の着衣形状の算出手法の発展として、人体形状などの骨格による変形を、その形状内部に充填した粒子の移動により求めようとするものである。

3DCG アニメーションにおいて、オブジェクトを骨格に沿って変形する技術をスキニングと呼ぶ。このとき、オブジェクトの表面にある頂点座標は頂点座標の合成 (ブレンドイング) により決定する。しかし、この手法では関節部において形状の収縮や陥没が起こる場合がある。

これを避けるために粒子を用いる手法が提案されているが、オブジェクトの変形を精度良く行おうとすれば粒子の数を増やす必要があり、計算時間が増大してしまう。そこで本研究では、この粒子径を適応的に変化させ、精度を保ちながら少ない粒子数で変形を行うことにより、計算を高速化する手法を開発した。

4. 研究成果

(1) グラフィックスハードウェアを用いた積雪形状の算出

グラフィックスハードウェアを用いた積雪形状の算出は、当初活用を計画していたアキュムレーションバッファが他の機能で代替すべき推奨されない機能とされ、本研究においてもこの機能の活用による十分な効果は得られなかった。

これに対して、頂点テクスチャフェッチ機能を利用した変異マッピングは、積雪形状の表示の際のホストコンピュータとグラフィックスハードウェア間のデータ転送量の削減に寄与する。

(2) 着衣形状のモデリングの隠面消去処理を応用した高速化

① 布のモデル化

本研究では図1のように布を三角形の集合体としてモデル化する。これは一般的な形状モデリングソフトとの親和性を考慮したものである。

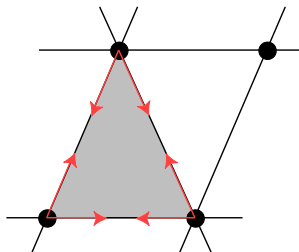


図1. 布のモデル化

この布は以下の性質をもつものとした。

(a) 弾性的性質…糸の繊維方向に伸びにく

く、繊維に対して斜め方向には伸びやすい。
(b) ドレープ…布は曲がりやすいため、布が垂れた時などにひだ形状のものが表れる。

(c) 塑性的性質…布は力が加えられると、すぐには元の形に戻らずにある程度その形を維持する。

(d) 異方性…糸の縦方向と横方向など、方向によって物理的性質が異なる。

本研究では布を三角形により表現するため、布の異方性を表現するために必要な繊維方向の力学的特性値をデータ構造上に配置することが難しい。そこで本研究では、布の形状データに繊維方向の情報を持たせたテクスチャをマッピングすることにより、布の各部に力学的特性値を設定することにした。

② 布の力学的特性

布に対して以下の力学的特性を設定した。

(a) 張力、せん断力

張力とせん断力は、布の伸長・圧縮に対する抗力であり、伸長・圧縮による変位から自然長に戻ろうとする力としてばねの弾性力で近似する。圧縮が起こる場 ($0 < r < L$) と、伸長が起こる場合 ($r \geq L$) とで場合分けをした式を以下に示す。

$$f_e = \begin{cases} a(r-L)^2 & (0 < r < L) \\ b(r-L)^2 & (r \geq L) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 r は各質点の二点間距離、 L は自然長、 a は圧縮の場合のばね定数、 b は伸長の場合のばね定数である。

(b) 曲げ抗力

曲げに変形による抗力は、隣接する三角形間の角度に基づく三角関数により近似する。近似した式を以下に示す。

$$f_b = \frac{c(\cos\theta - 1.0)}{d} \quad (2)$$

ここで、 c は曲げ定数、 θ は各三角形の法線同士のなす角度、 d は回転軸から力が加わる点までの距離である。

(c) 外部力

重力に関しては、布を構成する頂点数で布全体の重さを割り、各頂点に加わる力を計算した値を直接布のモデルの y 座標値に加える。

$$f_g = \frac{W}{p} \quad (3)$$

ここで、 W は布全体の重さ、 p は布を構成する頂点数である。

(d) 摩擦力

衝突による摩擦力は、布のモデルがオブジェクトと衝突したとみなされたものに対してのみ加える。

$$\begin{aligned} F &= F_0 \\ F_0 &= \mu N \\ \tan\theta^{-1} &= \mu \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 F_0 は最大摩擦力、 μ は最大摩擦係数である。張力 T と最大摩擦力 F_0 よりも大きくなった時点で布は動き出す。

一般には、これらの力をもとに運動方程式を解いて質点の位置を決定するが、本研究では衣服の最終的な形状を求めることを目的とし、布のモデルの変位に力の値を直接加えて最終的な形状を得る手法を用いた。

③ テクスチャによる異方性の表現

テクスチャは本来物体形状の表面にマッピングする画像の色データ (RGB 値もしくは RGBA 値) だが、ここでは各画素の RGBA 要素に繊維方向の情報を格納する。三ツ井らによって実測されたデータ [1] をもとに図 2 に示す定数 K_a , K_b , K_c , K_d を定義する。

この画像データ (異方性テクスチャ) は通常のテクスチャと同様の手法で布形状にマッピングする。すなわち、布形状の各頂点にこのテクスチャ上の位置を対応付ける。

ある頂点における特性値を取得する場合は、隣り合う頂点との位置関係を各質点の頂点番号から求め、各質点が受ける力の方向を求める。この方向によって、図 2 のように x 方向に繋がれた頂点同士であれば K_a , y 方向に繋がれた頂点同士であれば K_b , x, z 方向の合成方向に繋がれた頂点同士であれば K_c あるいは K_d を取得する。そして取得した値を定数 K として張力の式 (1) に掛けた式 (5) による力 f_e' を各質点に加える力に用いる。この力を用いて最終的な形状を決定する。

$$f_e' = \begin{cases} K \cdot a(r-L)^2 & (0 < r < L) \\ K \cdot b(r-L)^2 & (r \geq L) \end{cases} \quad (5)$$

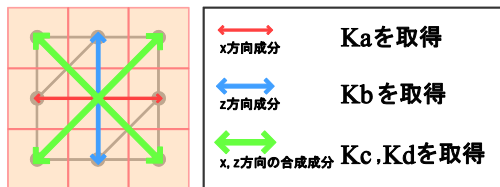


図 2. 対応する方向からの情報取得

④ 干渉の検出

本研究は 3D キャラクタの着衣形状の算出を目的とするため、人体モデルを用いた衝突の検出実験を行った。これは精密に行おうとすれば非常に時間のかかる処理となるため、本研究ではグラフィックスハードウェアのデプスバッファを用いてこれを高速に検出する手法を採用した。

干渉検出は図 3 のように真上、正面、背面の 3 方向のデプスバッファからの干渉オブジェクトまでの奥行値を取得し、その値から衣服モデルまでの変位の差を動的に取得しながら、その値が 0 になれば衝突したとみなす。

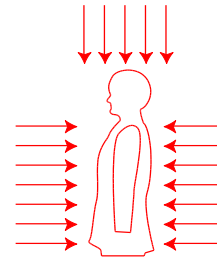


図 3. 3 方向からのデプスバッファの取得

これにより、データ量に対して $O(n)$ の計算量で衝突を検出できるため、一般に $O(n^2)$ となるポリゴン同士の衝突検出に比べて高速な処理が可能になる。

⑤ 実装結果

図 4 に提案手法による人体モデルに対する着衣形状の算出結果を示す。

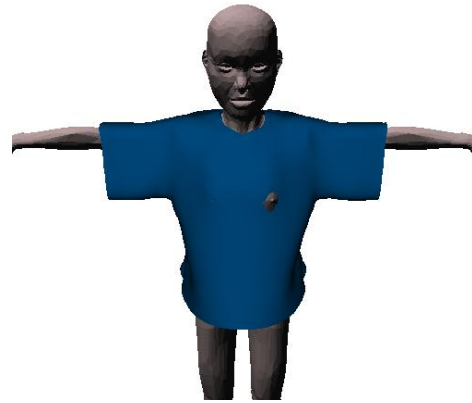


図 4. 人体モデルを用いた実験結果

⑥ まとめ

布を三角形の集合として表現し、布の性質と力学的特性を考慮したモデルを考案し、これを用いて物理的法則に則った布らしい形状を得る手法を提案した。また、デプスバッファ法を用いて布とオブジェクトの干渉処理の計算量 $O(n)$ で処理し、デプスバッファを真上、正面、背面の方向から取得して着衣形状への適用を可能にした。しかし、人体モデルを用いた実験では正確な衝突検出が行うことができず、人体モデルの胸部分に布モデルがめり込んでしまった。

今後の課題として、デプスバッファとモデルの各頂点との比較だけでなく、Occlusion Query を用いてデプスバッファと三角形 (ポリゴン) の比較を行う必要がある。また、布の異方性を表現するテクスチャを布の固い部分や柔らかい部分に別々に適用することにより、布の素材によって異なる特性を表現できるのではないかと考えている。

[1] 三ツ井茂, 駒井太樹, 戴曉群, 古川貴雄, 高寺政行, 清水義雄, 橋本稔, “布の力学特性における非線形性と異

方性を反映したパーティクルモデルとその衝突・反発メカニズム”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 54, No. 12, pp. 1762-1770, 2000

(3) 粒子ベースの変形シミュレーション

3DCG アニメーションにおいて, オブジェクトを骨格に沿って変形する技術をスキニングと呼ぶ. このとき, オブジェクトの表面にある頂点座標は頂点ブレンドングにより決定する. しかし, この手法では関節部において形状の収縮や陥没が起こる場合がある. これを避けるために粒子を用いる手法が提案されているが, オブジェクトの変形を精度良く行おうとすれば粒子の数を増やす必要があり, 計算時間が増大してしまう. そこで本研究では, この粒子径を適応的に変化させ, 精度を保ちながら少ない粒子数で変形を行うことにより, 計算を高速化する手法を開発した.

① 粒子の充填

任意のモデルに対して粒子を配置する手法について説明する. まずモデルが収まる直方体に, 最密になるように粒子を充填する. その後, モデルを構成する三角形のポリゴンおよび粒子を $y-z$ 平面に投影する. 投影した三角形の中に, 粒子の中心が入っているか内外判定を行う. 粒子が内部にある三角形を x 座標の小さい順にソートし, 小さい方から順に見ていき, 交差した面の数が奇数の部分に粒子を詰める. 最後に, 表面付近の粒子を削除し, 粒子を多面体で近似して同様の処理を行うことにより異なる大きさの粒子を充填することが可能である.

② 粒子に働く力

粒子に働く力として, 粒子間の距離に応じた力, 粒子の相対速度に応じた力, ボーンの操作量に応じた力, ボーンとの相対速度に応じた力の 4 種類の力を考慮する. 粒子間の距離に応じた力と粒子の相対速度に応じた力を相互作用力と呼ぶ. 相互作用力の働く範囲は, 図 5 に示すように, 最初に粒子が配置された際に間に粒子が入らない距離をもとに定義する.

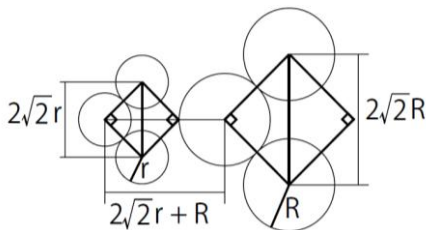


図 5 相互作用力の働く範囲

(a) 粒子間の距離に応じた力

二つの粒子が接している場合, その粒子の中心点の距離はそれぞれの半径の和となる.

粒子間の距離がその値のときを安定状態とし, 近いときは斥力, 離れているときは引力を働かせ, 安定状態に近づくように力を発生させる.

(b) 粒子の相対速度に応じた力

粒子間の距離に応じた力だけでは粒子の運動は収束しない. そこで相互作用力の働く範囲内にある粒子との相対速度を減少させるように力を発生させることで粒子の運動を収束させる.

(c) ボーンの操作量に応じた力

変形前に対応するボーンの基準点から粒子へのベクトルを保存する. そのベクトルに対して対応するボーンと同様の座標変換を行い, ボーンの変形に完全に追従した粒子の座標を求める. 図 6 のように粒子の現在の座標を求めた座標に近づけるように力を発生させることで, ボーンの操作量を粒子の移動に反映する.

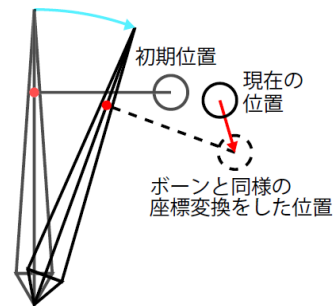


図 6 ボーンの操作量に応じた力

(d) ボーンとの相対速度に応じた力

粒子間の距離に応じた力と同様に, ボーンの操作量に応じた力だけでは粒子の運動は収束しない. そのため粒子の運動を減衰させる力を発生させる必要がある. ボーンからの操作量を減衰は対応するボーン上の基準点との相対速度を減少させるように力を発生させることで実現する. ただし 1 ステップあたりのボーンの基準点の速度は微小であるため, これは 0 とする.

③ 粒子の移動

粒子に働く力は 4 種類の力の総和で求めることができる. 粒子の運動は運動方程式に従うものとし, この運動方程式を解いて, 粒子の移動量を求める. 数値解法には改良オイラー法, アダムス法, leapfrog 法を拡張した方法を用いた. ただし, leapfrog 法はそのままでは提案手法に適用できないため, オイラー法を用いて拡張を行った. また, アダムス法, leapfrog 法は繰り返し計算を行うことにより, 精度の向上が可能である. 提案手法では繰り返しの上限を 100 回とした.

④ ポリゴンへの変換

まず各頂点に対応する粒子を近い順に四つ選ぶ. 頂点の決定方法は, 変形前の対応する粒子から頂点へのベクトルを求め, そのベ

クトルに対し、対応するボーンと同様の座標変換を行う。座標変換したベクトルと粒子の位置から頂点の位置を求め、四つの平均値を新しい頂点の位置とする。

⑤ 実行結果

粒子径一定の場合と変化させる場合で、充填後の粒子数を比較した。比較に用いたオブジェクトを図7に示す。同図(a)(c)のようにある程度太さのあるオブジェクトでは粒子数が大きく減少した。しかし、(b)のような板状のオブジェクトでは大きな粒子がすべて削除されてしまうため、粒子数は減少しなかった。

1ステップあたりの計算時間を測定した結果、図8のように繰り返しの有無による差しか現れなかった。次に、図9のようにタイムステップの限界値の測定を行った。その結果、繰り返しの有無を除くと、leapfrog法を拡張した手法がタイムステップを最も大きくとることができた。また、繰り返しの有無を行うとタイムステップを約1.3倍大きくとることができた。この二つの結果から、本研究の手法では繰り返しの無いleapfrog法が適している。

直方体の変形結果を図5に示す。曲げ変形を行った場合、関節部で陥没や収縮は発生していない。またねじり変形では、頂点ブレンドイングを行った際に発生するキャンディラップ減少も発生していない。

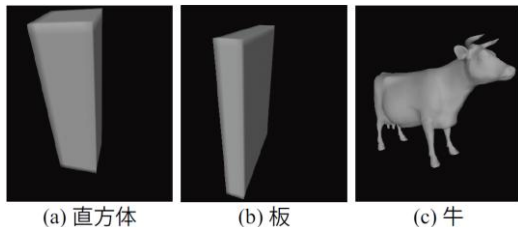


図7 充填結果の比較オブジェクト

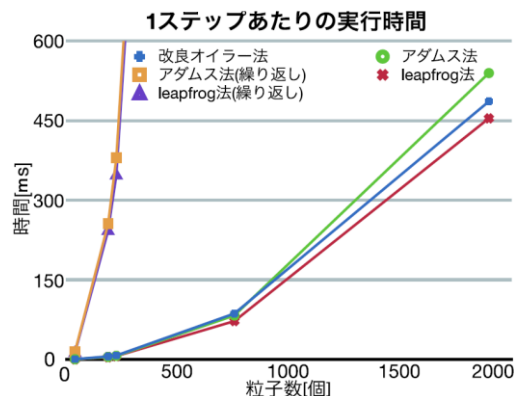


図8 各数値解法の実行時間

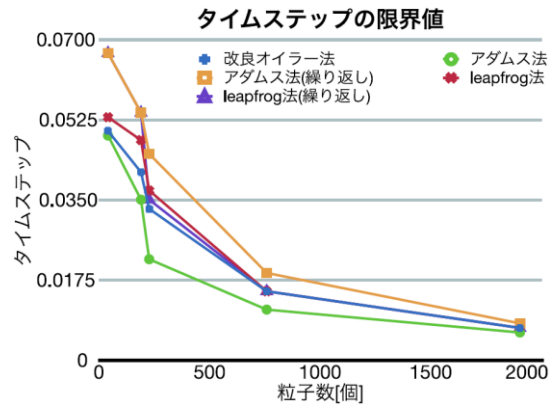


図9 各数値解法のタイムステップの限界値

⑥まとめ

本研究ではオブジェクトの形状を適応的な粒子径の粒子で近似し、粒子に働く力を計算してスキニングを行う手法を開発した。またleapfrog法を拡張することで、タイムステップを大きくとり、実行時間の短縮を行うことができる。空間分割等の高速化手法と組み合わせることで、より高速なスキニングが行えると考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① 山本正幸, 床井浩平, 骨の存在を考慮した粒子ベースのスキニング, 第26回NICOGRAPH論文コンテスト, 2010年9月25日, アイーナ・いわて県民情報交流センター (岩手県盛岡市)
- ② 中村直樹, 床井浩平, 粒子法を用いた破壊シミュレーションの高速化, 情報処理学会関西支部大会, 2010年9月22日, 大阪大学中之島センター
- ③ 山本正幸, 床井浩平, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会 第140回研究発表会, 2010年9月8日, リゾーピア熱海 (静岡県熱海市)
- ④ 山崎亮平, 床井浩平, 布の異方性に対応したクロスシミュレーション手法, 画像電子学会誌, Vol. 39, No. 1, 2009年12月16日芝浦工業大学, 豊洲キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

床井 浩平 (TOKOI KOHE)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号: 70188746