A110

CG 画像を利用した高速ふく射計算法の開発とその応用

塩谷 憲司[○], 加賀 昭和, 近藤 明, 井上 義雄(大阪大学)

池島 薫, 上中 隆史((株)アドバンスドナレッジ研究所)

Development and application of fast calculation method of thermal radiation using CG images

Kenji SHIOTANI, Akikazu KAGA, Akira KONDO, Yoshio INOUE,
Kaoru IKEJIMA and Takashi UENAKA

ABSTRACT

This paper shows the development and the application of the fast calculation method of view factors using computer graphics (CG) images. This method uses the perspective images made by CG technique in order to calculate view factors that are necessary in heat transfer problems. The process to illustrate the perspective images by CG corresponds to searching planes with numerical calculation method such as Monte Carlo method. We showed view factors could be calculated at high speed by using graphics hardware. It was found that the accuracy of this method using CG technique was within the acceptable limit. We applied PPM to the rolling mill factory model only to perform the thermal environment assessment. It was verified that this method has a possibility to become an effective tool for the analysis of heat transfer problems with heat radiation.

Keywords: Thermal radiation, View factors, First calculation method, CG images

1. 緒 論

熱ふく射による伝熱問題の解析には、ふく射体から放射された全放射エネルギーのうち、被ふく射体が放射エネルギーを受ける割合を表す形態係数が必要不可欠である。形態係数は解析領域における幾何学的関係によって決定され、単純な幾何形状では解析的に厳密解が求められている¹⁾。しかし、一般の解析領域は複雑な3次元幾何学形状を有し、形態係数を解析的に求めることは困難であるため、モンテカルロ法²⁾に代表される数値計算法が用いられている。モンテカルロ法は、乱数を用いて放射方向を決定し、ふく射体から多数の放射粒子を飛ばし、解析領域中にある遮へい面の衝突面判定を行い、形態係数を求める手法であり、汎用性に富むため広く用いられている³⁾。しかし、実用精度の解を得るためには、膨大な数の放射粒子を飛ばす必要があり、その際に衝突面判定を幾度も行うため、計算時間を要することが問題とされていた。

一方、Nusselt の射影法に基づき、対象点周りに設置した仮想的な半立方体の側面を投影面に、3次元中の複雑形状を投影して形態係数を求める Hemi-Cube 法⁴⁾がある。Hemi-Cube 法では、投影面への透視変換により形態係数を算出しており、形態係数の計算手法が本質的に透視図の描画手法と共通であることを示している。また、その際に必要となる透視投影変換の操作が、3次元 CG のためのグラフィックス・ハードウェアを用いることで

高速に処理できることが示唆されている⁵⁾。しかし、実用化はされておらず、またその精度の検証もされていなかった。

著者らはグラフィックス・ハードウェアを利用し、対象点周りに設置した四角錐の側面を透視図投影面として作画した CG 画像から形態係数を高速に計算する角錐投影法 (PPM: Pyramid Projection Method) を新たに開発し、CG 画像の解像度による精度検証を行った⁶⁾。本報では、まず本手法の概要を述べ、簡易モデルでの精度評価を行い、熱間圧延工場を模したふく射温熱環境モデルに本手法を実際に応用することで、実用化が十分可能であることを示す。

2. 高速ふく射計算法の開発

2.1 角錐投影法による形態係数算出

Fig.1 に示す視点 O にある単位面積の底面と、3次元空間中の微小面積 dS との間の形態係数 dF は、 dS の立体角 $d\Omega$ を投影面 α に投影した面積 dS'' を用いて、次式で表される。

$$dF = \frac{dS'' \cos \theta \cos^3 \theta_{xy}}{\pi} \quad (1)$$

ここで、 θ は z 軸と OP とのなす角であり、 θ_{xy} は OP と投影面 α への垂線 OO' とのなす角である。投影面 α は、O を底面の中心とし、Fig.1 の単位半球に仰角 $\theta_0 = \pi/4$

の点 O' で接する四角錐の側面である。平面角 $\varphi_0 = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ の 4 方向に対応する四角錐の 4 側面を投影面とすることで形態係数 dF を求める。4 方向は同様であるので、以降 $\varphi_0 = \pi/4$ を代表させて考察する。著者らが開発した本手法を角錐投影法 (PPM : Pyramid Projection Method) と名づける。

Fig. 1 Pyramid Projection Method

Fig. 2 に PPM による形態係数の算出までのフローチャートを示す。はじめに対象となる 3 次元図形を定義するが、その際、形態係数の算出対象となる図形要素ごとに異なる色(RGB 値)情報を付加する。そして、PPM の方式にそって、グラフィックス・ライブラリや CG ソフトウェアを用い、グラフィックス・ハードウェアを介することで高速に透視図を作成する。作成された透視図の画素の色情報から図形要素を特定する。透視図の解像度に合わせて、式(1)によりあらかじめ作成しておいた透視図の画素ごとの形態係数表から対応する図形要素に各画素の形態係数の値を加算していくことで、3 次元空間中のそれぞれの図形要素に対する形態係数を求める。これを平面角 $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ の 4 方向に対して行う。

Fig. 2 PPM flowchart

2.2 角錐投影法 (PPM) の精度評価

PPM を簡易形状モデルに適用して、形態係数を求め、精度評価を行う。適用する形状モデルは Fig. 3 に示す立方体である。立方体の 3 面を 5×5 のメッシュで、各面 25 個の図形要素に区切った立方体モデルである。メッシュの分割数を 10×10 , 20×20 と細かくした場合についても考察する。

Fig. 3 Evaluation model

PPM により求めた形態係数の値を正解値と比較するため、十分に形態係数の値が収束したとみなせるように垂直および水平方向を 3000 分割して、合計 900 万の放射粒子を Lambert の余弦則を満たすように、すべての方向に飛ばす総視野角分割法で形態係数の正解値を求めた。

PPM で求めた面要素 i に対する形態係数 VF_i と正解値 LVF_i との誤差 err_i を比較するために、ここでは次式を用いる。

$$err_i = VF_i - LVF_i \quad (2)$$

メッシュ分割数 10×10 で、メッシュ要素 i の PPM と正解値との絶対誤差 $|err_i|$ の空間分布図を Fig. 4 に示す。この透視図の解像度は 640×480 である。底面付近の図形要素の誤差が小さいのは、底面付近にある図形要素の形態係数の値そのものが小さいためである。誤差が大きくなる場所は二等辺三角形の頂点より少し下の所に分布しているようであるが、それ以外の規則的かつ法則性のある特徴はみられない。

Fig. 4 Error distribution
(Mesh divisions: 10×10 , Resolutions: 640×480)

メッシュ分割数 10×10 における各図形要素の形態係数の誤差を透視図の解像度が(a) 80×60 , (b) 2560×1920 の場合について Fig. 5 にヒストグラムで示す。透視図の解像度を十分に上げ、有効画素数を増やした場合、誤差の分布は平均値 0 の正規分布に近づく。よって、本手法の誤差は系統的なものではないことが推測される。

Fig. 5 Histogram of errors
(Mesh divisions: 10×10)

本手法の誤差はデジタル画像を用いることによる量子化の誤差のみに起因するものと仮定して、出口 7) による曲線で囲まれた図形の面積をデジタル画像上の画素数で近似したときの誤差の分散から、面積計算における標準誤差 σ_a は、

$$\sigma_a = \frac{n_T^{-3/4} n_D^{-1/4}}{\sqrt{48}} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 n_T は投影画像上の有効画素数 (二等辺三角形内の画素の総数)、 n_D は分割した図形要素の総数である。各条件下での標準誤差の大きさと、デジタル画像の量子化誤差に起因するとして求めた式 (3) とを比較した結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 Standard error compared with theoretical estimation

誤差の大きさの目安を与える式として式(3)が有効であることがわかる。結果として、本手法の誤差は主として量子化誤差に起因するものであり、必要な精度に応じた解像度の透視図を用いれば、実用上問題のない精度で形態係数を算出できる。

Fig. 3 に示した $1/4$ 半球領域の簡易形状モデルにおいて、PPM および総視野角分割法で、形態係数を求めたときの計算時間を Table 1 に示す。PPM では解像度 500×500 の透視図を用い、モデルはあらかじめ定義した状態から透視図を描き、形態係数を求めるまでの時間である。PPM アクセラレータ ON とは、グラフィックス・ハードウェアを利用した場合で、PPM アクセラレータ OFF とはグラフィックス・ハードウェアを利用せずに透視図を作画した PPM により求めた場合である。本計算で用いた計算機仕様は、OS: Windows XP Professional, CPU: Pentium4 3.40GHz, グラフィックス・ハードウェア: RADEON X800 XT, グラフィックス・ライブラリ: OpenGL である。グラフィックス・ハードウェアのアクセラレータ機能を使用すると、透視図を高速に描くことができるので、形態係数が高速に求まることがわかる。また、メッシュ分割数が大きくなると、アクセラレータ OFF のときは時間がかかるようになるが、アクセラレータ ON では計算時間の増加が少ない。ただ今回の計算対象モデルは、遮へい面が多数存在しない簡易形状であるので、総視野角分割法においてメッシュ分割数による差があまりみられていない。しかし、PPM アクセラレータ ON の場合は、総視野角分割法に比べ飛躍的に高速化されているのがわかる。

Table 1 Computational time of view factors

メッシュ 分割数	PPM アク セラレータ ON	PPM アク セラレータ OFF	総視野角 分割法 900 万
5x5	0.0111 s	0.1796 s	1.654 s
10x10	0.0116 s	0.2941 s	1.657 s
20x20	0.0133 s	0.5216 s	1.672 s

3. 工場内温熱環境シミュレーションへの応用

3.1 熱間圧延工場のふく射計算モデル

PPM を用いて、熱間圧延工場内の温熱環境評価を行う。高温物質を扱う工場では、気流が大きな影響力を持ち、金属溶解で発生する金属ヒュームなどからの汚染を防ぐために換気の研究もされている⁸⁾。しかし、本研究では、圧延された高温の鉄が運ばれてくる過程を見学する人が受けるふく射熱と、見学位置との関係を考察することを目的とし、ここではふく射のみを扱う。

Fig. 7 に熱間圧延工場モデルの計算対象領域を平面図と側面図で示す。50m(幅) $\times$ 50m(奥行き) $\times$ 20m(高さ)の領域で、 $100 \times 100 \times 100$ メッシュ分割である。

Fig. 7 Calculated area

圧延機により圧延された 1200°Cの平板が、Fig. 7 (平面図)で左から右へと一続きに出てくる。そのとき、見学者通路中央にいる身長 1.7m の人が顔部分の点 C で受けるふく射温度を PPM により求める。圧延された鉄以外、モデル内の物体および壁面はすべて 20°C と仮定した。点 C のふく射温度 T_C は次式で求める。

$$T_C = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n f_{C,i} T_i^4} \quad (4)$$

ここで、 $f_{C,i}$ は、点 C に対するメッシュ要素 i の形態係数で、 T_i はメッシュ要素 i の温度である。

3.2 ふく射温度の計算結果と考察

見学者と圧延ヤードまでの距離 h_t は 20m, 30m, 40m の 3 ケース、 h_s は見学路の高さ 3m, 4m, 5m の場合、すなわち見学者の身長 1.7m を考慮して 4.7m, 5.7m, 6.7m の 3 ケースについて、圧延ヤードに平板が流れていない状態をスタートに、圧延機から 1200°C の平板が連続して右へ 50m 出てきた場合の見学者が受けるふく射温度を PPM により計算した結果を Fig. 8 に示す。

見学者からヤードまでの距離 h_t が一定のとき、見学者通路の高さ h_s が高いほど、受けるふく射温度は上がる。通路の高さ h_s が一定のときには、ヤードまでの距離 h_t が短いほど温度が高くなり、平板が 50m 出た場合、 $h_t=20m, h_s=5.7m$ では 140°C にも達するので、この場合は見学通路としては不適であることが分かる。

Fig. 8 Radiative temperature variations

また、100×100×100 メッシュ分割において、1 対象点のふく射温度は約 0.1 秒で計算できた。微小な立方体を考えると、立方体の 6 面のふく射温度が 1 秒以内で求めることが可能であり、これを用いたリアルタイム温熱環境評価シミュレーションへの可能性が示された。

4. 結論

グラフィックス・ハードウェアを利用し、対象点周りに設置した四角錐の側面を透視図投影面として作画した CG 画像から形態係数を高速に計算する角錐投影法 (PPM: Pyramid Projection Method) の精度および高速性を簡易形状モデルによって示した。本手法を熱間圧延工場に適用し、ふく射温熱環境評価を行うとともに、リアルタイムシミュレーションへの可能性も示すことができた。

参考文献

- 1) Siegel, R., Howell, J.R.: *Thermal Radiation Heat Transfer*, (1972), McGraw-Hill.
- 2) Howell, J.R., Perlmutter, M.: Monte Carlo Solution of Thermal Transfer Through Radiant Media Between Gray Walls, *Trans. ASME*, **86** (1964), pp.116-122.
- 3) 大森敏明, 谷口博, 工藤一彦: 室内ふく射環境の解析法の開発と床暖房への適用, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 42 (1990) pp. 9-18.
- 4) Michael, F.C., Don, P.G.: The Hemi-cube A Radiosity Solution for Complex Environments, *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH)*, **19-3** (1985), pp.31-40.
- 5) 今野雅, 倉淵隆, 鎌田元康: 放射熱伝達解析における形態係数の計算法についての研究, 日本建築学会環境系論文集, **572** (2003), pp.17-22.
- 6) 塩谷憲司, 加賀昭和, 近藤明, 井上義雄: CG 技術を用いた形態係数の計算法, 第 18 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, (2004) pp. 235-235.
- 7) 出口光一郎: デジタル画像計測における面積画素について, 計測自動制御学会論文集, **27-2** (1991), pp.227-229.
- 8) 辻克彦, 中村安弘, 水野稔: 鋳造工場の換気に関する数値予測, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 50 (1992) pp. 95-105.