

特 集 論 文

コンピュータグラフィックスによる模擬
環境外乱を用いた画像処理アルゴリズム
のロバスト性検証Robustness Verification of Image Processing
Algorithms Using Simulated Environmental
Disturbance by Computer Graphics宅 原 雅 人^{*1}
Masato lehara見 持 圭 一^{*2}
Keiichi Kemmotsu

車載画像処理システムの開発では、降雨、降雪などの天候の違い（環境外乱）に対して高いロバスト性を確保することが重要である。そのため、従来は大量の実画像を取得してロバスト性の検証を行っていたが、長い開発期間がかかる原因の1つとなっていた。そこで当社では、コンピュータグラフィックス（CG）を用いて天候やノイズなどを模擬した画像を生成し、系統的かつ定量的にロバスト性を検証するツールを開発した。本ツールは、各種の外乱をパラメータに基づいて生成し、実写画像上に重畳するものであり、少数のサンプル画像から大量の画像を生成できる。この結果、ロバスト性検証にかかる期間を大幅に短縮でき、ロバスト性の高い画像処理アルゴリズムを短時間で構築することが可能となった。

1. は じ め に

車載の画像処理システムは天候変化を含む様々な環境で使用されるが、このような環境においても一定の性能が維持できる能力（ロバスト性）が求められる。これまで、外乱に対するロバスト性の検証は、実環境下で取得した画像を用いて行ってきたが、再現性や定量性評価を行うためには、統計的に十分と考えられる大量の画像を取得する必要がある、長い開発期間がかかる原因の1つとなっていた。

そこで当社は、コンピュータグラフィックス（CG）を用いて天候やノイズなどの現象を模擬した画像を生成し、系統的かつ定量的にロバスト性を検証するツールを開発した。本ツールは、天候変化やノイズ・コントラスト低下といった各種の外乱を、パラメータに基づいて生成し、これを実写画像上に重畳することで、実環境中での環境外乱を模擬した画像を生成するものである。本ツールを利用して、少数のサンプル画像から大量の画像を生成することで、画像処理システムの検証時間の大幅な短縮が可能となった。

2. ロバスト性検証

2. 1 車載画像処理システムのロバスト性検証の課題

異なる環境において取得される画像は、画像の見かけの変化を引き起こし、その結果、画像処理システムの性能の低下の要因となり得る。天候条件以外にも、

カメラのレンズ、撮像素子の特性の個体差や、電子回路のノイズなども性能の低下要因となり得る。このような、画像処理システムの性能低下につながる要因は、システムにとっての“外乱”にとらえることができる。システムが、様々な環境で一定の性能を維持するためには、“外乱に強いアルゴリズム”を開発する必要がある。

アルゴリズムの設計者が、対処すべき外乱を十分把握できていれば、それに対応したアルゴリズムを構築できる。しかし、机上で想定できる外乱は少なく、実環境下での画像を取得しなければ分からないことも多い。また、構築したアルゴリズムが、実際にその外乱に対して対処できているかを確認するために、実際の画像を用いて検証を行う必要がある。そのため、これまでは、アルゴリズム構築に先立って（あるいは並行して）、実環境下で多数の画像を取得し、それらの画像を用いてアルゴリズム構築・検証を行ってきた。

しかし、システムが利用される環境下で、あらゆる外乱を含む画像を取得することは、現実的に困難である。天候だけを考えても、“雪、雨、霧”といった環境下の画像を取得するには、それぞれ実際にこのような天候が発生するのを待たなければならない。また、雪だけを考えても、雪の量や風の影響など、様々な要因によって画像の見かけが変わるため、単に雪の環境で画像を1シーン取得すれば十分、というものでもない。

^{*1} 技術本部高砂研究所電子・光技術研究室 技術士(情報工学)

^{*2} 技術本部高砂研究所電子・光技術研究室 主席

そのためこれまでは、統計的に十分であると思われるだけの大量の画像を取得し、これらを対象としたアルゴリズムの構築・検証を行ってきた。しかし、大量の画像を用いて長時間の検証をしたとしても、多様な実環境で実際に使用されたときにロバスト性があるかどうかの見込みや確信を得ることができず、また、実運用の時点で初めて遭遇する外乱があったときに、所定の性能を発揮できないことがあった。

2. 2 CGを用いたロバスト性検証ツール

そこで当社では、系統的かつ定量的にロバスト性を検証するツールとして、CGを用いたロバスト性検証ツールを開発した。本ツールは、天候変化・ノイズ・コントラスト低下といった各種の外乱をCGによって模擬的に生成する部分（外乱模擬部）と、品質工学を用いて定量的なロバスト性検証を行う部分（検証部）から構成される。

外乱模擬部では、CGによって生成した外乱を、実写画像上に重畳することで、実環境中での環境外乱を模擬した画像を生成する。模擬する外乱は、カメラが撮影している対象空間内の環境変化（天候外乱）と、カメラ内部のレンズ、撮像素子の特性や電子回路で発生する外乱（基本外乱）に対応している（図1）。

CGを用いた外乱生成のメリットは、パラメータを用いて定量的な外乱を生成できることと、1つの基準となる画像に対して異なる外乱条件の複数の画像を生成できることである。このようにして、実環境下で取得した少数のサンプル画像から、大量の検証用画像を生成することが可能となる。

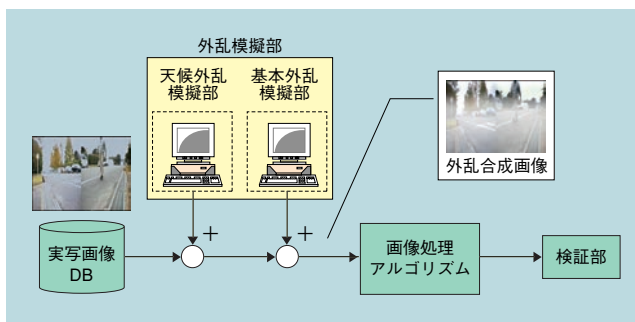


図1 ロバスト性検証ツールの構成

また、検証部では、系統的に外乱を変化させたときの画像処理アルゴリズムのロバスト性を定量的に算出し、画像処理アルゴリズムのパラメータと外乱の関係を定量化する。これにより、外乱に対してどのような特性を持っているのか、ロバスト性を向上させるために、どのパラメータをどの程度変化させればよいかの、予測や判断を行う指針が得られる。これにより、ロバスト性の高い画像処理アルゴリズムを短時間で構築することが可能となる。

ロバスト性検証ツールを用いることで、構築中のアルゴリズムに対して、大量の画像を用いてロバスト性を事前に検証することが可能となり、開発の効率化と、アルゴリズムのロバスト性確保が可能となる。

なお、ロバスト性検証ツールによる開発効率化は非常に有効なものであるが、実環境下で取得した画像による検証に対して完全に置き換えるものではない。しかしながら、従来のような大量の画像を用いた検証と比較して、本検証方法は飛躍的に少ないサンプル数での検証が可能となる。

3. 外乱模擬部

外乱模擬部は、レンズ、撮像素子の特性及び電子回路で発生する外乱を模擬する“基本外乱模擬部”と、カメラが撮影している対象空間内の環境変化を模擬する“天候外乱模擬部”とから構成される。

3. 1 基本外乱模擬部

基本外乱模擬部はカメラ内部で発生する外乱をシミュレートするソフトウェアである。これらの外乱を厳密に模擬するには、カメラの物理的な特性を反映したシミュレーションモデルを用いる必要があるが、画像処理アルゴリズムの品質検証には詳細特性は必要なく、簡易なモデルで性能を満たすことができる。例えば、“コントラスト変化”は、入力画像の輝度値を、線形に輝度変換するものである。

模擬できる外乱は、コントラスト変化、ガウシアンノイズ、ゴマ塩ノイズ、ガンマ値変換、色温度変換、歪み、画像ぼけ、変形の8種類である。図2に模擬結果の例を示す。



図2 基本外乱模擬部による外乱模擬の例

3. 2 天候外乱模擬部

天候外乱模擬部は、外乱のない天候状態（晴天の状態）で撮影した画像にCGで作成した天候変化を付加するソフトウェアであり、雨・雪・霧の3種類を模擬する機能を搭載している。天候の模擬には、市販のCG作成専用のレンダリングソフトウェアを用いており、各外乱の状態はパラメータで制御できるようになっている（例えば雨については、雨の量、降る角度を設定できる）。

これらの天候を厳密に模擬するには、画像に映る対象物に応じた処理が必要であるが、ここでは簡易的な手法を用いている。図3に示すように、入力画像は、レンダリングソフトウェア内の仮想カメラ前方に設置されたスクリーンで再生され、その前面に設置した雨粒・雪片や霧のスクリーンを通して仮想カメラで撮影される。

そのため、ここで模擬できるのは、画面内を通過する雨粒・雪片・霧であり、路面での反射・路面の色の变化・水たまり・雪塊などは模擬していない。図4に模擬結果の例を示す。

4. 検 証 部

従来のアルゴリズム検証では、実環境で撮影した画像を処理した時に得た結果を、設計者が検討・判断して、いわば試行錯誤的に、特定のパラメータの値を変更して、ロバスト性を向上させようとしていた。しか

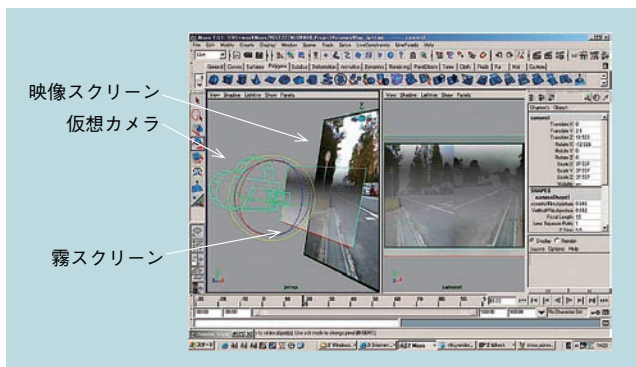


図3 天候外乱模擬部による模擬の仕組み

も、変更するパラメータの特定や、パラメータの変更量は、設計者の知識や経験や推測により決定していた。

このような方法に対して、ロバスト性検証ツールの検証部では、系統的に外乱を変化させたときの画像処理アルゴリズムのロバスト性を定量的に算出し、パラメータと外乱の関係を定量化する。

例えば、雨の量を少量から大量まで段階的に変化させていけば、降雨量の変化により画像処理アルゴリズムの性能がどのように変化していくのかを検証することができ、降雨量の変化に応じた画像処理アルゴリズムのロバスト性を系統的かつ定量的に検証することができる。

また、ロバスト性を向上させるために、画像処理アルゴリズムのどのパラメータをどの程度変化させればよいかの、予測や判断を行う指針が得られ、ロバスト性の高い画像処理アルゴリズムを短時間で構築することが可能となる。

さらには、パラメータ変更後において、再び外乱を系統的に変化させて、アルゴリズムの精度を再検証することにより、変更したパラメータの種類やパラメータの変更量が適切であったか否かを、正確に確認することができる。

5. “車載ノーズビューカメラによる移動物体検出システム”への適用

5. 1 “車載ノーズビューカメラによる移動物体検出システム”

本システムは三菱自動車工業(株)で開発中のシステムであり、見通しの悪い交差点頭出し時に死角となる左右の安全確認を補助するものである⁽¹⁾⁽²⁾。図5に示すように、車両前方の左右に取り付けられた“ノーズビューカメラ”を用いて自車に接近してくる物体（車両、自転車）を画像処理によって検出し、車両と接近物体が交差するまでの時間を算出して情報提供を行なうものである。

5. 2 ロバスト性検証ツールを利用した評価結果

実環境下では、雨や雪などの環境や、路面形状によ



図4 天候外乱模擬部による外乱模擬の例



図5 車載ノーズビューカメラによる移動物体検出システム

る接近物体の挙動などの外乱が検出性能に影響を与える。そこでロバスト性検証ツールを適用し、システムのロバスト性を検証した。

移動物体検出システムは、画像中の特徴点を抽出し、動き（オプティカルフロー）を計算するアルゴリズムが用いられている。雨や雪などの外乱環境下では、特徴点を抽出する際に、雨粒や雪を特徴点として抽出することで誤検出の増加が考えられるため、本アルゴリズムには、接近物体上の特徴点以外のものを除去するためのノイズ除去フィルタを搭載している。

図6に、雪を合成させた画像と、雪の外乱のない画像での処理結果を示す（本結果は、三菱自動車工業（株）で実施したものである⁽²⁾）。横軸は経過時間、縦軸は接近交差時間である。移動物体検出システムが出力する接近交差時間の誤差を評価するため、同時に計測したレーザレーダの出力から求めた値についても参考として示している。接近物体の検出開始時間が若干遅れ、誤差も若干大きくなっているものの、2秒以上前から接近交差時間を算出できており、ノイズ除去フィルタによって外乱が効果的に除去されているといえる。

6. ま と め

ロバスト性検証ツールの開発により、天候やカメラ内で発生する現象を模擬した画像を生成し、画像処理アルゴリズムを系統的かつ定量的に検証することが可

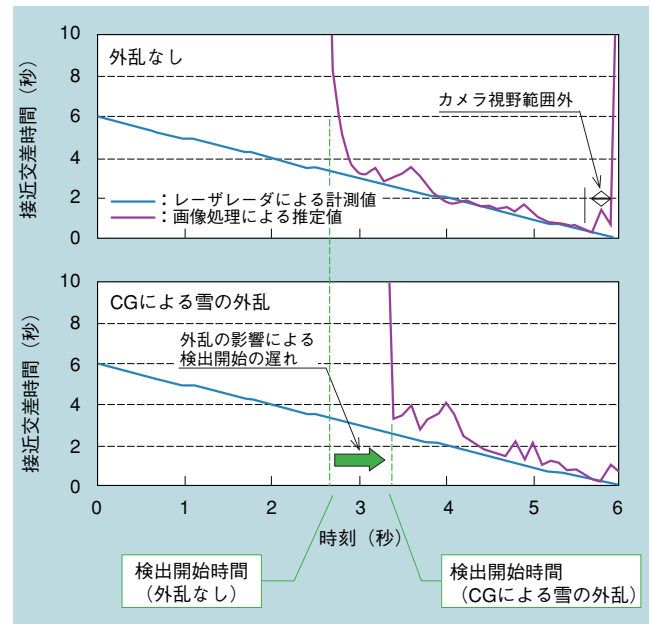


図6 外乱環境下での接近交差時間推定結果

能となった。従来、大量の実画像を取得して行っていたものであるが、本ツールを用いることで、少数のサンプル画像から様々な条件の画像を生成することが可能となり、開発コストの低減が可能となる。

“車載ノーズビューカメラによる移動物体検出システム”への適用に当たっては、三菱自動車工業（株）のご協力をいただき、心より感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 前村高広ほか、車載ノーズビューカメラによる移動物体検出システム、自動車技術会春季学術講演会予稿集、No.56-07（2007）
- (2) 上南恵資ほか、車載ノーズビューカメラによる移動物体検出システム（第2報）、自動車技術会秋季学術講演会予稿集、No.100-07（2007）



宅原雅人



見持圭一