

機関番号：32660

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500165

研究課題名（和文） 高速動き・距離検出イメージセンサの開発と
車載用画像処理システムへの応用研究課題名（英文） Image sensor for high-speed motion and depth detection and
its application to in-vehicle image processing system

研究代表者

浜本 隆之 (HAMAMOTO TAKAYUKI)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：10297624

研究成果の概要（和文）：

本研究は、2眼ステレオカメラで取得した画像から被写体の距離や相対速度を検出する画像処理システムの構築を目指して検討した。二つのカメラの焦点を異なる位置に設定し、二つの画像のぼけ量の違いと視差の情報から距離等を推定する方式を提案し、その有効性を確認した。さらに、多眼撮像用に試作したCMOSイメージセンサとFPGA等を用いて画像処理システムを構築し、リアルタイムで画像処理を実施できるようにした。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we investigated the method to detect depth and relative velocity of objects by using stereoscopic-camera images for the implementation of real-time image processing system. First, we proposed the method of estimating depth and relative velocity by using the amount of focus blur and disparity information when the focus positions of two cameras were set to be different. According to the result of simulation, the depth and relative speed were estimated reasonably. In addition, we composed a prototype system for the real-time image processing. The system consisted of CMOS image sensors designed for multiple-camera system, an FPGA, a PC, and other devices.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2009年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：画像情報処理・情報センシング

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：イメージセンサ・画像認識・車載・距離検出

1. 研究開始当初の背景

(1) ITS(高度道路交通システム)の主要な技術として、車載カメラを用いた画像センシング技術の研究開発が進められている。車載カメラは、1990年代初期からドライバーの見えない後方をモニターするために搭載されており、近年では、様々な認識用に前方を撮像するカメラや室内を撮像するカメラなど、その装着数は増加の傾向にある。また、応用シ

ステムの機能も多様化しており、夜間における障害物の認識や白線検出に基づくはみ出し認識、前方車両との距離の認識、などがあげられる。

(2)このような車載カメラに用いられるイメージセンサは、1/4型30万画素クラスで、毎秒30フレーム、ダイナミックレンジ40dB程度のものが主流である。また、100万画素、

毎秒 60 フレーム、ダイナミックレンジ 90dB が数年後の目標値としてあげられている。しかし、前方の障害物を認識し衝突を回避することを前提とすると、毎秒 60 フレームでの撮像でも不十分である。例えば、毎時 60km で走行している車は、乾いた路面においても約 20m の制動距離を必要としており、障害物を認識しブレーキを踏むまでの時間を考慮すると停止するまでの距離は 35m 程度となる。このとき、進行方向に対して垂直に（横から）別の車が同程度の速度で侵入すると想定した場合、少なくとも毎秒 300 から 500 フレーム以上での撮像が必要と見積もられる。

(3) 車載用のイメージセンサとして毎秒 300 フレーム以上のものはほとんどない。一般のイメージセンサでは、例えばソニーが毎秒 300 フレームで撮像できる CMOS イメージセンサを開発しているが、特殊な用途を除き高フレームレート撮像が可能なものは少ない。また、撮像のみならず、後段で認識処理をリアルタイムに行う必要があり、高フレームレートな車載用システムとして応用できるものは見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、高いフレームレートでの障害物（車両）認識に適した動き検出と、前方に位置する車両と自車両間の距離の検出において、ハードウェアへの実装に適した手法を検討する。さらに、高速撮像が可能でステレオ処理に有用な機能を集積したイメージセンサを用いた障害物認識・衝突回避システムを開発し、その有効性を確認することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高フレームレート画像を用いた動き検出についての検討

ハードウェア化に適した高速動き検出手法について検討する。フレームレートが高いため、動き検出のためのブロックサイズと探索範囲は狭くてよい。また、画像内の位置に応じた動き方向のみを検出するなど、適切なブロック形状とサイズ、探索範囲の決定について検討する。

(2) 高フレームレート画像を用いた距離推定についての検討

ハードウェア化に適した高速距離推定手法について検討する。動きが検出された物体あるいは指定の物体について、2 眼のイメージセンサを用いて距離を推定する。二つのイメージセンサの合焦距離を異なるように設定し、ステレオ情報とピントのボケ情報を組み合わせることで、より正確な位置と接近速度の検出を実現する方式について検討する。

(3) 車載用画像処理システムの開発

複数のスマートイメージセンサ (256×256 画素) を用いて、車載用画像処理システムを構築する。本システムボードに搭載した FPGA によりイメージセンサを制御し、その出力データを用いて前方を走行する車両の距離を推定する。本システムの動作性能を明らかにし、有効性を確認する。

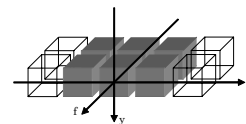
4. 研究成果

(1) 高フレームレート画像を用いた動き検出

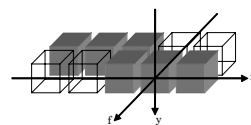
① 自車両走行車線に進入する物体の動き検出

直進車両の前方面像では、消失点 (FOE) より左側に静止している物体は左下方向に、右側に静止している物体は右下方向に動く。一方、走行車線に横から進入する人や車両が存在する時、直進する車両に対して横方向の動きと、自車両が障害物に近づくことによる下方向の動きが検出できる。

このような状況を想定し、水平方向と斜め下方向の動きの検出を考える。FOE の左側では右向きの動きを検出するために、図 1 に示すように、 f フレームにおける 1×3 画素の対象ブロックと、 $(f-1)$ フレームにおける同一位置のブロック及びその位置から左方向に 3 画素まで 1 画素ずつ移動させたブロックのマッチングを行なう。式 (1) によりブロックの各画素の輝度値 $l_{f:x+a,y}$ と範囲内の各画素の輝度値 $l_{(f-1):x+a-b,y}$ ($b=0 \sim 3$) の差分絶対値を求める。その差分絶対値の和が最小となる位置から、このブロックの移動量が求められる。FOE の右側に対してはこの処理を逆方向に行なう。



(a) 動きなし



(b) 右方向へ 2 画素の動き検出

図 1 FOE の左側における右方向への動き検出

$$\begin{aligned}
 m_0 &= \sum_{a=-1}^1 |l_{f:x+a,y} - l_{(f-1):x+a,y}| \\
 m_1 &= \sum_{a=-1}^1 |l_{f:x+a,y} - l_{(f-1):x+a-1,y}| \\
 m_2 &= \sum_{a=-1}^1 |l_{f:x+a,y} - l_{(f-1):x+a-2,y}|
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$m_3 = \sum_{a=-1}^1 |l_{f;x+a,y} - l_{(f-1);x+a-3,y}|$$

②指定ブロックの動き検出

路面の凹凸や車体の揺れによりカメラに動きがあるとき、その動きは画像中の物体の動きとして現れる。そのため、走行車線への進入物体の動き検出における誤りの原因となる。この時、FOE 付近の物体は十分遠方であるため、その物体の動きやカメラが直進することによる動きは小さくなる。従って、その部分の動きを検出することによりカメラの動きを推定し、進入物体の検出精度を向上させる。また、前方車両にブロックを設定すれば、前方車両の追従が可能となる。

f フレームにおける 32×32 画素の対象ブロックと (f-1) フレームにおける上下左右各 3 画素移動させたブロック間において、各画素の輝度値の差分絶対値を求める。その値が閾値以下の画素数をカウントする。カウントした画素数が最も多いブロックが、(f-1) フレームにおける対象ブロックの位置であるとし、ブロックの移動量を求める。また、ブロックの位置は外部から自由に決められるものとする。

(2)高フレームレート画像を用いた距離推定

①ぼけ量を用いた距離推定

図 2 に示すように、カメラを平行に配置しフォーカス位置を異なる距離に設定する。二つのカメラで現在と一定時間後の画像をそれぞれ取得し、自車両と前方車両間の距離と、その距離が縮む方向を正とした相対速度を推定する。以下に本方式の基礎となる、ぼけ量のみによる推定方式について説明する。なお、ここでは二つの画像間の視差に基づく位置対応は与えられているものとする。

ぼけ量を示す評価値 “d” をラプラシアンベースの式(2)によって定義する。評価値 “d” は注目画素とその 4 近傍の画素値を基にしており画素毎に算出する。値が大きい程ぼけ量が小さく、値が小さいとぼけ量が大きいとみなせる。また、この式(2)は加減算と絶対値処理で構成され、FFT を用いる方式と比較して回路規模が小さく、ハードウェア化が容易である。

$$d_{(x,y)} = |l_{(x+1,y)} + l_{(x-1,y)} - 2l_{(x,y)}| + |l_{(x,y+1)} + l_{(x,y-1)} - 2l_{(x,y)}| \quad (2)$$

(l:輝度値, (x, y):画素位置)

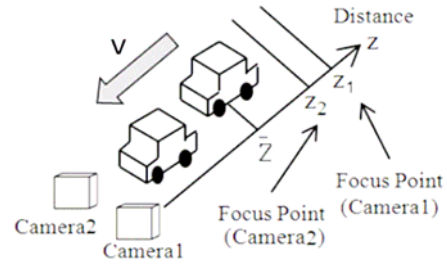


図 2 自車両上のステレオカメラと前方車両の関係

式(3)のようにブロック内の画素における閾値以上の評価値 “d” を積算し、これを F と定義する。ここで、閾値処理を行うのはテクスチャの平坦領域などで “d” 値が不安定になる事が確認されており、ノイズ除去を行うためである。閾値との比較は回路規模が小さく、ハードウェア実装における負担やそれによる処理速度の低下は小さい。また、距離に応じて前方車両の拡大や縮小があるときは、ブロックサイズを変えることで精度の改善が見込まれる。その際には、ブロックサイズに応じて定数 α を調整する。

$$F = \alpha \sum_{i=x-N}^{x+N} \sum_{j=y-N}^{y+N} d_{(i,j)} \quad \text{for } d_{(i,j)} \geq th \quad (3)$$

(th:評価値 “d” 用閾値, $(2N+1)2$:ブロックサイズ, α :定数)

本方式は、DFD (Depth from Defocus) 方式に基づいており、対象までの距離に応じたぼけ量の変化はガウス関数を用いて表現できるものと仮定している。まず、図 2 における 4 枚の画像の F をそれぞれ F_{11} , F_{12} , F_{21} , F_{22} とする。ただし、添え字の左側はカメラ番号、右側は時刻を表す。この四つの F から、ブロック内の対象物体との距離 z と相対速度 v を推定する。具体的には図 3 に示すように四つの F があるガウス関数上にあるとすれば、式(4)に示す四つの式が成り立つ。このとき、距離 z は式(5)、相対速度 v は式(6)で求まる。なお、図 3 は最初のフレームにおける対象物体の距離を基準としている。また、 Δt は既知である。

$$F_{11} = F_{peak} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z_1 - z}{\sigma_F} \right)^2 \right\} \quad (4.1)$$

$$F_{12} = F_{peak} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z_1 + v\Delta t - z}{\sigma_F} \right)^2 \right\} \quad (4.2)$$

$$F_{21} = F_{peak} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z_2 - z}{\sigma_F} \right)^2 \right\} \quad (4.3)$$

$$F_{22} = F_{peak} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z_2 + v\Delta t - \bar{z}}{\sigma_F} \right)^2 \right\} \quad (4.4)$$

(\bar{z} :距離, v :相対速度, σ_F :標準偏差, F_{peak} :
ガウス関数のピーク値, Δt :フレーム間隔)

$$\bar{z} = \frac{z_1 \left\{ (B-C)^2 + 4AC \right\} + z_2 \left\{ (B-C)^2 - 4AB \right\}}{2(B-C-2A)(B-C)} \quad (5)$$

$$v = \frac{(B+C)(z_1 - z_2)}{(B-C-2A)\Delta t} \quad (6)$$

$$(A = \ln F_{11} - \ln F_{21}, \quad B = \ln F_{11} - \ln F_{12},$$

$$C = \ln F_{21} - \ln F_{22})$$

σ_F^2 の推定値を用いることで、距離と相対速度の値が有意か判定を行う。式(4)を用いて導出した σ_F^2 を式(7)に示す。

$$\sigma_F^2 = \frac{(z_2^2 - z_1^2) - 2(z_2 - z_1)\bar{z}}{2A} \quad (7)$$

σ_F^2 の値は本来プラスの値であるので σ_F^2 がマイナスの値になった場合、推定した距離と相対速度は誤りであると判定する。また、距離の値もマイナスになることはないため、その推定値がマイナスとなった場合も同様に誤りと判定する。

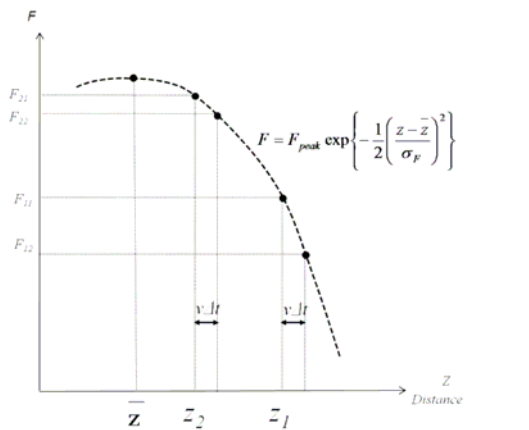


図3 4枚の画像におけるFと距離の関係

②ぼけ量と視差量の二つの情報を用いた距離推定

カメラを平行ステレオ配置した場合の視差 p [画素]と物体までの距離 z_p の関係を式(8)に示す。

$$z_p = \frac{D}{2 \times p \times \tan \frac{1}{2} \phi} \times N \quad (8)$$

(D :カメラ間隔, ϕ :画角, N :撮像した画像の水平方向の画素数)

視差 p を変化させながら仮に与え、距離の推定値と式(8)から計算された z_p ができる限り一致するような最適な p を検出する。具体的にはまず、図2のカメラ1のブロック位置から視差 p だけカメラ2のブロック位置を水平方向に移動させ、移動させたブロック位置において F を算出し、それぞれを F_{21p} , F_{22p} とする。 F_{11} , F_{12} , F_{21p} , F_{22p} から式(5)を用いて距離を算出し、これを p とする。また、式(8)を用いて z_p を算出する。次に、式(9)のようにブロック内の輝度値の差分絶対値和 SAD_p を求める。 P , z_p , SAD_p の三つの値から、式(10)により評価値 E_p を算出する。視差 p をある範囲において変化させ、評価値 E_p を最小とする p に対する距離 p と z_p の平均値を、距離の最終的な推定値とする。また、相対速度は評価値 E_p が最小となった位置での、式(6)から算出された値を最終的な推定値とする。なお、定数 β で二つの成分の重みを調整する。

$$SAD_p = \sum_{i=x-N}^{x+N} \sum_{j=y-N}^{y+N} |I_1(i,j) - I_2(i+p,j)| \quad (9)$$

(I_1 :カメラ1画像の輝度値, I_2 :カメラ2画像の輝度値)

$$E_p = |\bar{z}_p - z_p| + \beta \times SAD_p \quad (10)$$

③シミュレーションによる評価

図4に示すようなサイズが 640×480 画素で画角が 20.4 度のカメラの画像に、距離に応じてガウス関数によるぼけと視差をつけた画像を用いて本方式の評価を行った。ここで、カメラ1のフォーカス位置を 45m 、カメラ2のフォーカス位置を 30m 、自車両と前方車両との相対速度を 10km/h 、フレームレートを 30fps とし、カメラ設置間距離は自動車のルームミラーの両端にカメラを設置した時に想定される距離 0.3m とし、距離に関わらず対象物体の大きさを固定とした。物体までの距離 100m を 10cm 間隔で評価した。処理対象とするブロックは画像中の $(245, 198)$ を中心とした大きさ 200×200 のブロックとした。

シミュレーション結果を図5に示す。推定結果を誤りと判定したものは、距離を -5m としして表示した。なお、提案方式のパラメータは比例定数 α を 1 、 β を 0.5 、閾値 th を 10 とした。

図5において誤り判定されなかった距離の中で、正解値との差が $\pm 5\text{m}$ 以内の距離の割合は 91.1% であった。特に $10\text{m} \sim 60\text{m}$ の範囲においては、推定した距離値と正解値との誤差を2乗平均で求めると 1.06m であり、ほぼ正しく距離が推定できている事がわかる。



10m 50m
(a) カメラ1の画像:合焦距離 45m



10m 50m
(b) カメラ2の画像:合焦距離 30m

図4 シミュレーション用画像

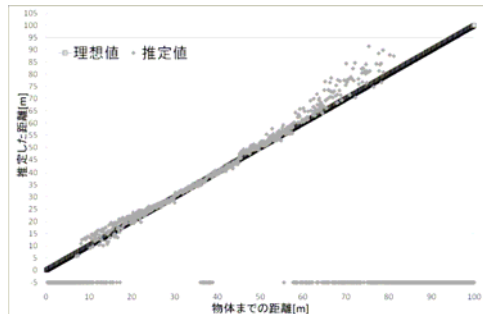


図5 提案方式のシミュレーション結果

(3) 車載用画像処理システムの開発

①本システムに実装したCMOSイメージセンサ
本システムに用いている CMOS イメージセンサは我々が多眼画像処理用に試作したもので、以下に示す様々な機能を有している。この CMOS イメージセンサの仕様を表1に示す。

- ・グローバル、ローリングシャッター
両方のシャッター動作に対応している。
- ・ランダムアクセス
アドレスデコーダにより出力アドレスの指定を行い、任意の画素値を出力できる。
- ・センサセレクト
複数のセンサを利用する場合に、各センサに固有のアドレスを指定でき、信号線を共有していても設定したアドレスと指定するアドレスが一致したセンサからのみ出力できる。
- ・出力値補正
出力電圧のオフセットと傾きを調整でき、複数センサ間での画素値のばらつきを調整できる。

表1 CMOSイメージセンサ仕様

| | |
|-------------------------------------|-------------|
| Number of pixels [pixels] | 256 x 256 |
| Die size [mm ²] | 6.3 x 6.2 |
| Pixel size [um ² /pixel] | 18.6 x 18.6 |
| Number of transistors [trs./pixel] | 7 |
| Fill factor [%] | 20.1 |
| Power [V] | 3.3 |

②高速処理を目指したシステムボードの構築

図6に新しく構築したシステムボードの概観を、図7にその概略を示す。本システムボードには、CMOSイメージセンサ(256×256画素)×3個、FPGA(Xilinx社製Virtex-5 XC5VSX35T)、動作周波数100MHzのAD変換器×2個、200MHzの差動出力水晶発振器、200MHzのシングル出力水晶発振器、256MbitのSDRAM、18MbitのSRAMが搭載されている。

このシステムボードを用いて検証実験を行った。まず、水晶発振器からの200MHzの信号をFPGA内で5MHzに分周する。次に、それを基にFPGAで制御信号を生成し、約0.013秒ごとにPCに画像信号を出力する。図8に本システムボードからの出力画像の例を示す。このシステムボードはインタフェースカードを介して、外部のコンピュータと直接接続しており、画像データの表示や、リアルタイムでの画像処理が可能になっている。

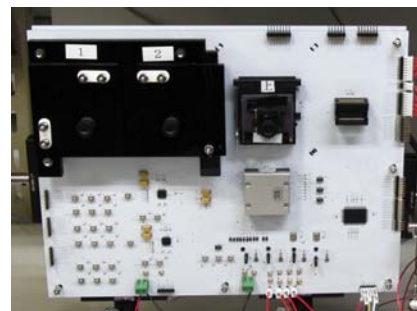


図6 システムボード外観

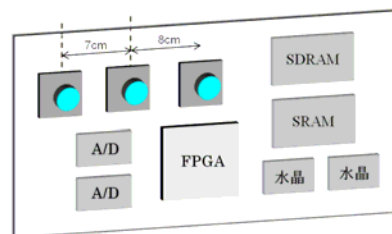


図7 システムボードの概略図



図8 左側のイメージセンサの出力画像例

(4) 本研究の成果と今後の課題

本研究の主な成果としては、2眼ステレオ画像において、ぼけ量と視差の情報を用いて被写体までの距離と相対速度の推定方式を提案し、その有効性を確認した。さらに、多眼画像処理用に試作したCMOSイメージセンサとFPGA等を用いて画像処理システムを構築したことが挙げられる。現在、本システムに接続されたコンピュータ上で画像処理が行えるものの、距離推定などの方式はFPGAに直接実装されていない。今後は、システムボード上のメモリ素子などを活用し、実装を図る予定である。

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)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Mitsuyasu Ito, Yoshiaki Takada, Takayuki Hamamoto, Distance and Relative Speed Estimation of Binocular Camera Images Based on Defocus and Disparity Information, Proc. of Picture Coding Symposium, 査読有, 2010, CD-ROM, 4pages
- ② 伊藤光保, 高田佳明, 浜本隆之, 2眼カメラ画像におけるぼけ量と視差の情報を用いた車両間の距離と相対速度の推定, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J93-D, No. 9, 2010, 1709-1713
- ③ 伊藤光保, 高田佳明, 浜本隆之, ステレオカメラ画像におけるぼけ量と視差の情報をを用いた距離と相対速度の推定とそのシステム構築, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 34, no. 34, 2010, 1-4
- ④ 伊藤光保, 高田佳明, 浜本隆之, ぼけ量と視差の情報をを用いた距離推定と2眼カメラによるシステム構築, 映像メディア処理シンポジウム予稿集, 査読無, I2-18, 2009, 51-52
- ⑤ 鋪野敦紀, 浜本隆之, ステレオ動画の視差と動き情報に基づくオクルージョン領域の検出, 画像符号化シンポジウム予稿集, 査読無, P5-05, 2009, 85-86
- ⑥ 中山賢一, 川島慶弘, 浜本隆之, 児玉和也, エッジ情報に基づくピクセルマッ

ングを用いた高速オプティカルフロー検出イメージセンサ, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, vol. 32, no. 57, 2008, 25-28

- ⑦ 高田佳明, 浜本隆之, フォーカス位置が異なる2つのカメラ画像におけるぼけ量を用いた距離推定, 映像メディア処理シンポジウム予稿集, 査読無, I5-13, 2008, 139-140

[学会発表] (計6件)

- ① Mitsuyasu Ito, Distance and Relative Speed Estimation of Binocular Camera Images Based on Defocus and Disparity Information, Picture Coding Symposium, 2010年12月9日, 名古屋
- ② 伊藤光保, ステレオカメラ画像におけるぼけ量と視差の情報を用いた距離と相対速度の推定とそのシステム構築, 映像情報メディア学会メディア工学研究会, 2010年8月30日, 新潟
- ③ 伊藤光保, ぼけ量と視差の情報を用いた距離推定と2眼カメラによるシステム構築, 映像メディア処理シンポジウム, 2009年10月8日, 修善寺
- ④ 鋪野敦紀, ステレオ動画の視差と動き情報に基づくオクルージョン領域の検出, 画像符号化シンポジウム, 2009年10月7日, 修善寺
- ⑤ 中山賢一, エッジ情報に基づくピクセルマッチングを用いた高速オプティカルフロー検出イメージセンサ, 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 2008年12月16日, 東京大学
- ⑥ 高田佳明, フォーカス位置が異なる2つのカメラ画像におけるぼけ量を用いた距離推定, 映像メディア処理シンポジウム, 2008年10月, 修善寺

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜本 隆之 (HAMAMOTO TAKAYUKI)
東京理科大学・工学部・准教授
研究者番号: 10297624

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

保坂 忠明 (HOSAKA TADAAKI)
東京理科大学・工学部・助教
研究者番号: 60516235
児玉 和也 (KODAMA KAZUYA)
国立情報学研究所・コンテンツ科学
研究系・准教授
研究者番号: 80321579