



レーダとカメラの融合で検知範囲拡大・横断者識別を実現した横断者検知センサ

Pedestrian Detection Sensor with Radar and Camera for Expanding Detection Area and Enhancing Pedestrian Identification

浅野 峻也*
Shunya Asano

藤田 渉
Wataru Fujita

持田 英史
Eiji Mochida

岸本 健吾
Kengo Kishimoto

近年、米国では歩行者の死亡事故が急増しているため、交通事故防止を目的とするシステムに使用する横断者検知センサの需要が高まっている。しかし、既存センサの多くは垂直方向の検知範囲角度が十分ではない。実際の交差点では、センサは高所に設置されるため、センサ直下付近が死角となる。そのため、設置地点と横断歩道が隣接する場合、横断歩道の一部や横断歩道の流入口に存在する歩行者を検知できない。この課題への対策のため、筆者らはレーダにカメラを組み合わせたフュージョンセンサを試作した。このフュージョンセンサは、カメラがセンサ直下の横断者を検知することでセンサ直下の死角を解消する。また、カメラ画像に対して物体認識AIを用いることで、レーダ単体では困難であった検知対象の種別の識別も可能となる。本稿では、試作したフュージョンセンサ構成の紹介と性能検証実験の結果を報告する。

In the U.S., the increase in pedestrian fatalities has led to a rising demand for pedestrian detection sensors in systems aimed at preventing traffic accidents. However, many existing sensors lack sufficient vertical detection range since they are typically installed at high positions in actual intersections, creating blind spots directly below them. In cases where the installation point is adjacent to a pedestrian crossing, there are instances where parts of the crosswalk or waiting area may go undetected. To address this issue, we have prototyped a fusion sensor combining radar with a camera. The fusion sensor eliminates blind spots below it by detecting pedestrians at the spots with the camera. Furthermore, using object recognition AI with camera images enables the sensor to identify the type of detection targets, a challenge for radar alone. This paper introduces the prototyped fusion sensor configuration and presents the results of performance verification experiments.

キーワード：交通安全、横断者検知、レーダ、カメラ、フュージョンセンサ

1. 緒言

米国における歩行者の死亡事故は2010年から2022年の間に77%の増加を示しており⁽¹⁾、歩行者保護のために安全運転支援システムや信号のタイミング最適化に関する取り組みが進められている⁽²⁾。これらのシステムを実現するための路側センサとしてレーダ^{*1}、画像センサ^{*2}（カメラ、赤外線カメラ等）、LiDAR^{*3}などを使用した横断者検知センサの需要が高まっている。特にレーダは昼夜の明暗、雨や霧といった天候変化に強い利点がある。しかしながら、横断者検知センサを普及させるためには、設置場所の確保が大きな課題となる。設置用に新しいポールを建てるには大きなコストが必要であり、さらには様々な理由から新しいポールを建てることが不可能な交差点も多い。そのため、既存のポールを活用することが交差点に横断者検知センサを設置するための必須条件となる。一方で、既存センサの多くは垂直方向の検知範囲角度が十分ではないため、横断者検知をセンサの遠方と近傍で両立することは困難である⁽³⁾。

そのため、**図1**のようにポールと横断歩道が隣接する場合は、センサ直下にある横断歩道の一部もしくは横断歩道の流入口に存在する横断者の検知ができない。

また、レーダはカメラやLiDARと比べると形状認識能力に劣り、横断者がどのような種別（歩行者、自転車、車い

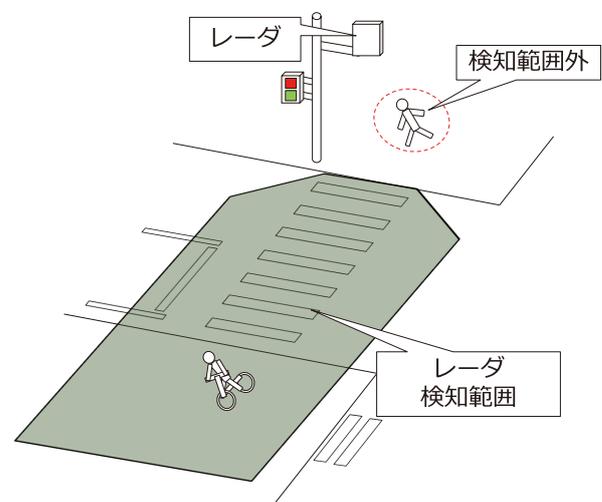


図1 レーダ設置模式図

す利用者、白杖利用者、等) であるか識別することは困難である。横断者の事故リスクは種別によって異なり、例えば車いす利用者は100,000人年あたりの死亡率において、歩行者の死亡率と比べて36%高いことが示されている⁽⁴⁾。そのため、横断者を識別することで事故リスクの高い横断者の抽出が可能と考えられる。

そこで、筆者らはレーダと直下向きカメラで構成されたフュージョンセンサを試作した。直下向きカメラがセンサ直下を検知することで、レーダ単体で生じていた死角を排除することができる。また、カメラの画像に対して物体識別AIを適用することで、レーダ単体では困難である横断者の識別も可能となる。本稿では、試作したフュージョンセンサの構成と検証実験結果を紹介する。

2. フュージョンセンサ仕様

横断者検知センサは通常、図2に示すように交差点の角に設置される。フュージョンセンサ試作機の外観も同図に示す。また、試作したフュージョンセンサの仕様を表1に示す。

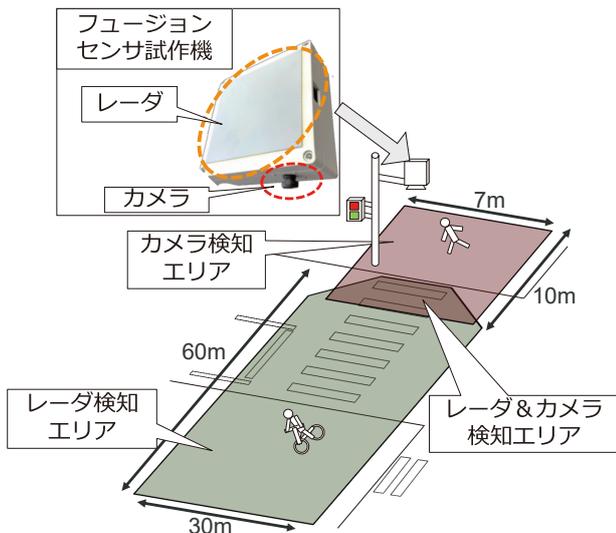


図2 フュージョンセンサ設置模式図

表1 フュージョンセンサ試作品の仕様

変調方式	FMCW ^{※4}
周波数	60.0-61.0 GHz
帯域幅	250MHz
レーダ検知範囲	センサ前方：4~60m センサ側方：30m
カメラ検知範囲	センサ前後：10m センサ側方：7m

3. 横断者検知方法

本章では、フュージョンセンサで横断者検知を行うために必要なセンサ統合方法と横断者判定アルゴリズムについて紹介する。

3-1 センサ統合方法

本稿のフュージョンセンサにおけるレーダとカメラの検知模式図を図3に示す。

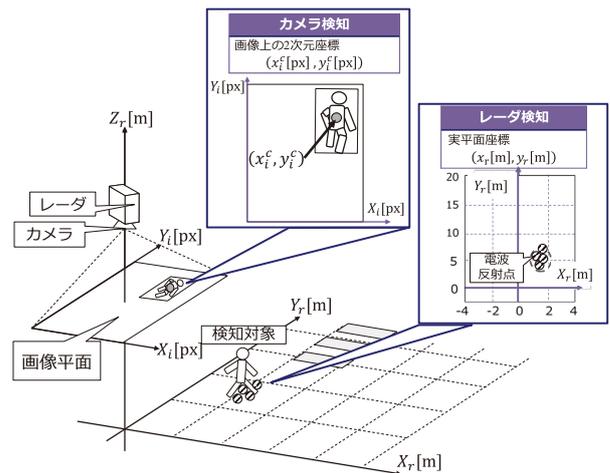


図3 レーダとカメラの座標系模式図

レーダからは平面座標 (単位：メートル)、カメラからは画像座標 (単位：ピクセル) における検知対象の位置情報が得られる。位置情報の座標系が異なると、レーダとカメラが同じ対象を検知したことを判定できず、検知統合を行うことができない。そのため、筆者らは透視投影変換を用いて画像座標系をレーダ座標系に変換することで検知統合を実現した。

透視投影変換は三次元座標を画像座標に変換するためのモデルであり、一般的に三次元座標系内に存在する物体がどのように画像上に投影されるかを模擬する際に使用される⁽⁵⁾。透視投影変換は以下の式で示される。

$$s \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x_i} & 0 & c_{x_i} \\ 0 & f_{y_i} & c_{y_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} \dots (1)$$

ここで、 f はカメラの焦点距離、 c は画像座標系の中心座標、 r は回転ベクトル、 t は平行移動ベクトルである。対象の画像座標系における位置 (x_i, y_i) を入力として、レーダ座標系における位置 (x_r, y_r) を出力とすることを考える。このとき、式 (1) は未知数4つ (s, x_r, y_r, z_r) に対して方程式が3つとなり解が一意に定まらない。そこでレーダ座

標における対象の高さ情報 $z_r = 0\text{m}$ と仮定した。これにより式(1)は未知数3つ(s, x_r, y_r)に対して式が3つとなり、カメラ座標系をレーダ座標系へ変換可能となる。

3-2 横断者判定アルゴリズム

横断者判定アルゴリズムについて説明する。レーダを用いて高精度に歩行者を検知するアルゴリズムが文献⁽⁶⁾で示されている。このアルゴリズムは最初に静止物体を除去する処理を施し、反射波の強度が閾値以上である物体の位置座標を観測値として抽出する。次に、この観測値を入力情報として連続的に動作する時系列フィルタを適用する。この時系列フィルタは、図4の状態遷移図に基づいて状態を変更する。

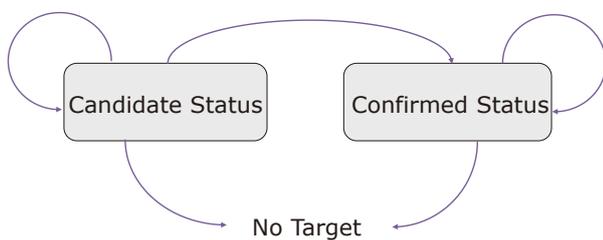


図4 状態遷移図

Candidate Status (候補状態) は、時系列フィルタの誤差分布を確定するために設けられており、この時点では検知した物体が横断者か否か確定していない。Confirmed Status (確定状態) は、検知物体が横断者であると確定した状態を表している。横断者の特徴を示す特定の条件が満たされた場合に候補状態から確定状態へ遷移する。観測値が歩行者候補状態および歩行者状態において一定時間以上連続して得られない場合、No Target (検知対象なし) となり時系列フィルタの検知は終了する。

本稿のフュージョンセンサでは、レーダに加えてカメラによる検知情報も存在する。カメラの位置検知結果は透視投影変換によってレーダ座標系へ変換できるため、上記のアルゴリズムの時系列フィルタはフュージョンセンサにも適応できる。しかし、レーダとカメラの検知領域が重複する領域では、検知情報の統合が必要になる。そのためフュージョンセンサにおける横断者検知では、同一対象を検知しているかを判定する処理を追加した。これはレーダとカメラの検知情報の位置差分が閾値以下となった場合にレーダとカメラの検知情報を紐づけるという処理である。これにより同一対象を検知しているという判定が可能となり、レーダカメラ間で種別情報を保持したまま検知を継続できる。

4. 実験結果

本章では、検証実験の結果を紹介する。

4-1 グラウンド実験

まずグラウンドで検証実験を行った。図5(b)に設置環境のイメージを示す。フュージョンセンサは高さ4mの位置に取り付けた。また、検知対象の動きを確認するためのリファレンスカメラも設置した。このとき、車いす利用者が図5(b)に示す軌跡のように動いた場合について、フュージョンセンサとレーダ単体の検知結果の比較を行った。

グラウンドにおける横断者検知の結果を図6に示す。図6(a)はリファレンスカメラで撮影した画像であり、検知対象である車いす利用者が存在することを示している。図6(b)と図6(c)はそれぞれフュージョンセンサとレーダ単体による横断者検知結果を示している。

このとき、フュージョンセンサでは $y = -4\text{m}$ から検知できているのに対してレーダ単体の場合は $y = +5\text{m}$ から検知が開始している。したがって、フュージョンセンサはレーダ単体に比べ9m手前から横断者を検知可能であり、レーダ単体の際の課題であった直下付近の死角が解消できてい

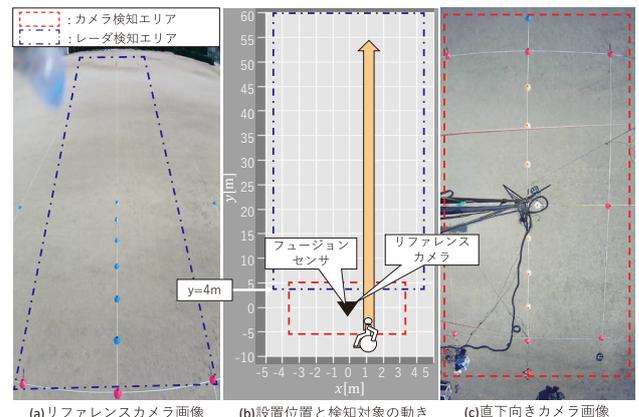


図5 グラウンド実験の設置環境

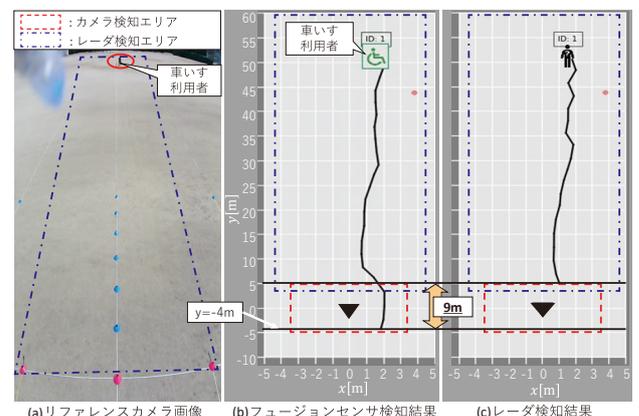


図6 グラウンド実験結果

レーダとカメラの融合で検知範囲拡大・横断者識別を実現した横断者検知センサ

ることがわかる。また、フュージョンセンサの検知結果には検知対象である車いす利用者のアイコンが正しく表示されており、カメラから得た種別情報を保持しながらレーダ領域でも検知を継続できていることを示している。

4-2 フィールド実験

次に交差点にフュージョンセンサを設置して性能検証実験を行った。図7(c)に設置環境のイメージを示す。フュージョンセンサは高さ4mの位置に取り付けた。また、リファレンスカメラおよび遠方直下カメラを設置した。遠方直下カメラは、フュージョンセンサが設置された歩道と横断歩道を挟んだ対岸の歩道に設置した。これにより対岸から横断歩道に流入する横断者の識別を可能とした。

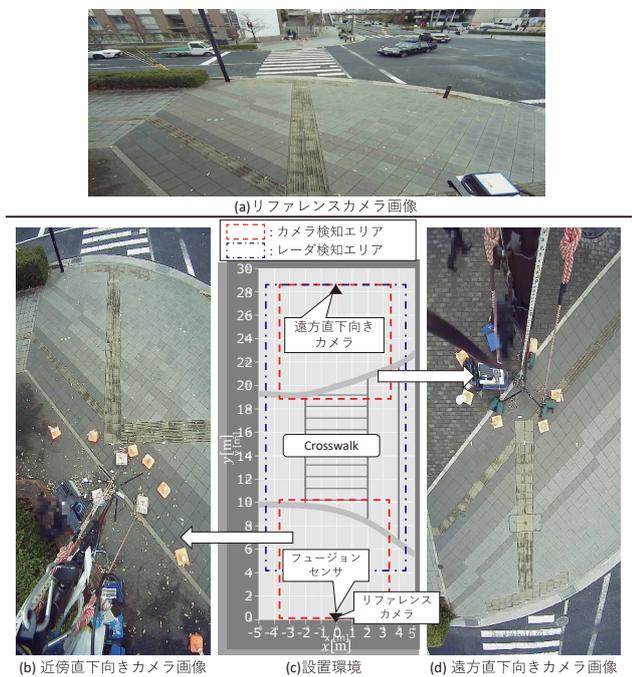


図7 フィールド実験の設置環境

実際の交差点における横断者検知の結果を図8(c)、図9(c)に示す。ここで図8(a)、図9(a)は、リファレンスカメラから得られた画像である。図8(b)、図9(b)は、フュージョンセンサに取り付けられた直下向きカメラの画像を示している。また、図8(d)、図9(d)は、遠方の直下向きカメラ画像である。

図8のシーンでは歩行者、自転車、白杖利用者の3人がフュージョンセンサの検知範囲に存在する。このとき、図8中の検知結果のアイコンが実際の種別と合致しているため、フィールドでも横断者の識別ができていることが分かる。また白杖利用者はレーダ単体では検知範囲外となるセンサ直下に存在するため、グラウンド実験と同じく直下カメラによってセンサ直下を検知できていることも確認で

きた。

図9のシーンでは、歩行者(A)、歩行者(B)、車いす利用者、白杖利用者、自転車の5人がフュージョンセンサ検知範囲に存在する。歩行者(A)、歩行者(B)、車いす利用者、白杖利用者は、カメラの検知範囲内には存在せず、レーダ単体で検知されている。この場合でも検知対象の種

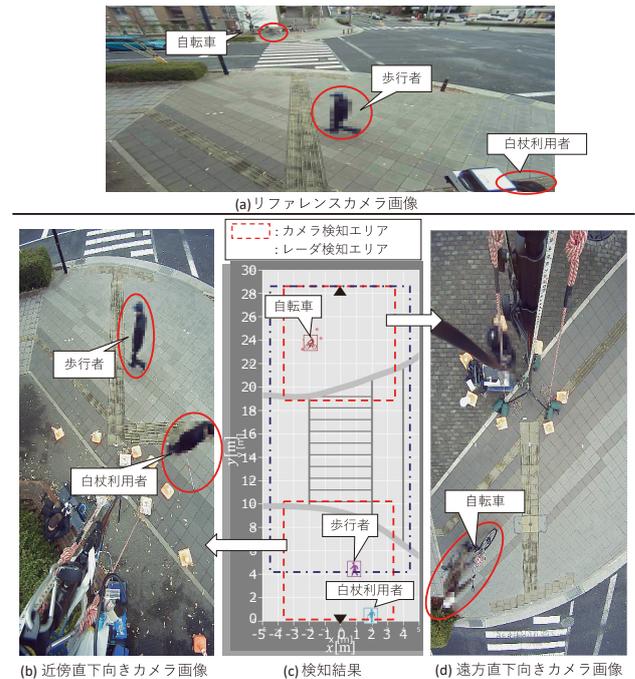


図8 [シーン1] フィールド実験結果

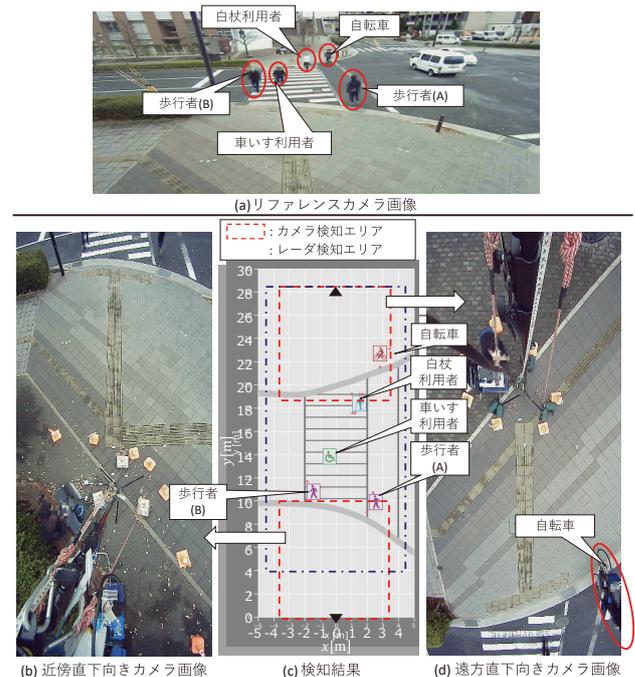


図9 [シーン2] フィールド実験結果

レーダとカメラの融合で検知範囲拡大・横断者識別を実現した横断者検知センサ

別を示すアイコンが表示されている。これはカメラ検知で得られた物体の種別情報を保持しながらレーダ検知領域でも横断者検知を継続できていることを示している。

5. 性能評価

次に、本実験環境における検出精度の評価結果について述べる。評価では、節4-2で示した交差点でフュージョンセンサの検知性能を評価した。評価指標として Miss detection time rate, False detection time rate, Misidentification time rate を用いた。各評価方式は以下の式で表される。

$$\text{Miss detection time rate} = \frac{\text{Miss detection time}}{\text{Total presence time of pedestrians}} \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \text{False detection time rate} \\ = \frac{\text{False detection time}}{\text{Sensor's detection time} + \text{False detection time}} \dots (3) \end{aligned}$$

$$\text{Misidentification time rate} = \frac{\text{Misidentification time}}{\text{Sensor's detection time}} \dots (4)$$

ここで、Miss detection time rate は横断者が検知エリア内に存在する際にセンサが検知できていない時間率、False detection time rate は実際には横断者がいない場所を検知した時間率、Misidentification time rate は横断者を検知できているが種別が間違っている時間率である。**表2**の結果から、試作したフュージョンセンサは実環境において、横断者の高い検出性能および識別率が得られることが確認された。

表2 フィールド実験における精度評価

Miss detection time rate	3.39%
False detection time rate	3.36%
Misidentification time rate	4.48%

6. 結 言

レーダとカメラを組み合わせることでセンサ直下付近の検知と横断者の種別識別を実現するフュージョンセンサを試作した。このフュージョンセンサによって信号灯器などの既存のポールに設置できる可能性が大幅に向上する。また、横断者の識別機能により横断歩道上に存在する交通制約者を検知・識別することで、事故リスクの高い横断者を考慮した信号制御用途への利用の可能性もある。

この新しい技術の活用により、交差点に設置される横断者検知用センサの普及が加速し、横断者の安全支援に寄与することを期待する。

用語集

※1 レーダ

電波を送信し、その反射波から得られる情報をもとに物体までの距離や方向、速度の計測を行うセンサ。

※2 画像センサ

デジタルカメラで撮影した画像を用いて、物体の存在を検知し、その物体の種別を判定するセンサ。

※3 LiDAR

Light Detection And Ranging の略。光を照射し、その反射光から得られる情報をもとに物体までの距離や形状の計測を行うセンサ。

※4 FMCW

Frequency Modulated Continuous Wave の略。信号周波数を時間とともに連続的に変化させる方式。

参 考 文 献

- (1) Governors Highway Safety Association (2024), Pedestrian Traffic Fatalities by State: 2023 Preliminary Data
<https://www.ghsa.org/sites/default/files/2024-06/2023%20Pedestrian%20Traffic%20Fatalities%20by%20State.pdf>
- (2) United States Department of Transportation Federal Highway Administration (2006), Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/06108.pdf>
- (3) 八幡雄介、白永英晃、東田宜男、岸正樹、東篤司、葉若秀樹、「広い視野角で設置自由度を向上したミリ波レーダ」、住友電工テクニカルレビュー第203号 (July 2024)
- (4) Kraemer JD, Benton CS. BMJ Open (2015). Disparities in road crash mortality among pedestrians using wheelchairs in the USA: results of a capture-recapture analysis, BMJ Open 2015;5:e008396, Doi : 10.1136/bmjopen-2015-008396
- (5) Z. Zhang, A flexible new technique for camera calibration, in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, doi: 10.1109/34.888718 (November 2000)
- (6) Atsushi Higashi, et al., Atsushi Higashi, A Pedestrian Detection Method based on 24-GHz Band Radar for Driving Safety Support Systems, ITS world congress 2019, Singapore (October 2019)

執 筆 者

浅野 峻也* : 情報ネットワーク研究開発センター



藤田 渉 : 情報ネットワーク研究開発センター



持田 英史 : 情報ネットワーク研究開発センター
グループ長補佐
博士 (工学)



岸本 健吾 : 情報ネットワーク研究開発センター
グループ長



*主執筆者