



# 赤外スペクトル情報応用の 路上障害物のセンシング

小杉幸夫\*・村瀬 亨\*・浅野太郎  
宇都 有昭・森口 雅弘・高岸 成典

Sensing On-Road Objects by Infrared Hyper Spectrum — by Yukio Kosugi, Toru Murase, Taro Asano, Kuniaki Uto, Masahiro Moriguchi and Shigenori Takagishi — Prevention of traffic accidents between human and vehicles on road has become one of the major issues today and the development of advanced in-vehicle safety systems is highly expected. A sensing system installed into a vehicle can be a solution to the issue, playing a complementary role for the elderly with poor detection capabilities, especially in aging society.

Although visible light imaging and thermal infrared ray (TIR) sensing have been put into practical use in some fields, yet they fall short of sensing accuracy due to their moisture-absorption property or susceptibility to other heat sources, such as vending machines.

Focusing on short wavelength infrared rays (SWIR), the authors have developed the basic technology of sensing and detecting objects by using hyper spectra. This paper presents an overview of the SWIR hyper spectrum sensing method and its evaluation system, along with the experimental results proving the method's high accuracy in human detection.

Keywords: hyper spectrum sensing, human detection, short-wave infrared

## 1. 緒 言

路上の人と車両の接触事故を如何に低減するかは安心・安全を目指す我が国の国民的課題の一つともなっている。特に年々進行する高齢化社会では、保護されなければならない歩行者の危険感知能力の低下を補う車両側への安全付加機能の強化が望まれている。例えば、温暖化防止のため急増しているハイブリッドカーや電気自動車などは、走行時の騒音が少ないというメリットの反面、歩行者が車両の接近に気が付かないというデメリットをも内在している。さらには、歩行困難者を対象とした電動車椅子の高性能化も、歩行者に対する危険要因となりつつある。これら、路上で歩行者と共存する車両に、歩行者やその他の障害物を識別する機能が賦与されれば、近接時にアラーム音を発生するなどの方法で、歩行者および車両運転者の両者に危険回避のための情報を提供することが可能となる。

このように、路上の歩行者および各種の障害物を検知・識別する方式としては、可視光画像の輝度ヒストグラムや

矩形特徴量など、2次元画像内の輝度値の空間的分布をもとにした特徴抽出が行われ、サポートベクターマシン (SVM) アルゴリズムを用いた処理精度の向上が図られている<sup>(1)</sup>。これとは別に、歩行者の検出に熱赤外センサを用いた方式も一部実用化されているが、熱赤外領域の電磁波は水分による吸収が大きいこと、自動販売機などの熱源を誤認識する可能性がある、背景との温度差が乏しい環境下では歩行者が見落とされるなどの問題点を有している。リモートセンシング分野で用いられる光学センサは、通常、表1のように対象とする波長域で分類されるが、本研究開発では、ハイパースペクトルセンサ（以下HSセンサと略記）で取得した各種障害物の反射スペクトルの特徴にもとづき、従来あまり関心が払われていなかった短波長赤外領域 (SWIR) に着目し、この波長域での反射スペクトル情報から対象物を検出するための基礎技術の開発・試作状況について報告する。

表1 リモートセンシングで用いられる各バンドの名称と波長域

名称	紫外	可視	近赤外	短波長赤外	中波長赤外	熱赤外
略号	UV	V	NIR	SWIR	MWIR	TIR
波長域	<400nm	400-760nm	0.7-1 $\mu$ m	1.0-2.5 $\mu$ m	3-5 $\mu$ m	8-14 $\mu$ m

## 2. ハイパースペクトル画像の取得と活用

未知の波長域での対象物の反射特性を調べるのには、HSセンサの利用が有効である。HSセンサは通常100を越える連続した狭帯域バンドに分けて対象物の反射スペクトル情報を検出する光学センサで、航空機や衛星から広域にわたっての地上の資源探査や土地利用の把握、農林業分野での植生の分析等、リモートセンシング分野では幅広い利用分野の開拓が進んでいる。同じ目的で用いられるマルチスペクトルセンサ（通常数バンド～数十バンド）とのバンド数による境界は必ずしも明確ではないが、隣接バンドの情報を連続的に取得できる分光機構を備えている場合にHSセンサと呼ばれる。航空機搭載のHSセンサとしては、NASAとカリフォルニア工科大学ジェット推進研究所が1987年から2009年現在も運用しているAVRIS（Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer）が最も長い観測の歴史を持っている<sup>(2)</sup>。このセンサでは、バンド数が224で380nm～2500nmをカバーし、高度20kmからの観測で、地上分解能20m、観測幅11kmとなっている。一方、衛星搭載のHSセンサでは衛星EO-1搭載のHyperion（バンド数210、地上分解能30m、観測幅7.5km）が2000年より運用されている。我が国ではHS観測衛星の2013年打ち上げを視野に入れてハイパースペクトルデータの利用基盤技術を開発すべく（財）資源・環境観測センター（ERSDAC）が「ハイパープロジェクト」を進めている<sup>(3)</sup>。このプロジェクトにおいては、航空機搭載のCASI（カナダItres社開発）およびAISA（フィンランドSpecim社開発）などのHSセンサによる各種の観測が実施されている。

本研究開発では、PGP分光機能を備えたラインセンサをクレーン車に搭載し、旋回等の動作で機械的に各種地物上をスキャンし、2次元のHS画像を取得する。また、このような画像取得が困難なケースでは、一定の視野角内の平均輝度スペクトルを計測する携帯型計測計を用いる。いずれの場合も、白色板校正によって各種対象物の反射率スペクトルを算出している。

ハイパースペクトルデータには、対象物の持つ各波長ごとの光の吸収や透過を反映した反射特性が含まれているため、対象物の物理的・化学的性質を推定する手がかりを与える。通常100バンドを超える膨大な画像データが取得されるが、その中の各バンド間にはかなりの冗長性があるため、特定の対象物に限定した場合、対象物の状態を推定するのに最低限必要なバンド数はそれほど多くはない。極端な場合、最も有効な2波長を選び、その波長の反射率について演算を行うことで、有益な情報が効率良く抽出可能である。中でも、古くからリモートセンシングの分野で用いられている指標の中に、正規化植生指標（NDVI; Normalized Difference Vegetation Index）がある。これは、680nm付近のクロロフィルの吸収に伴う反射率の低下と、近赤外領域の反射率増大の差を、両者の和で正規化したもので、広

域の衛星画像から植生状態を評価するのに有効である。

このような正規化指標は短波長赤外領域についても次式のように二つの波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ における反射率を $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ を用いて定義でき、さまざまな対象物の性質を抽出することができる。

$$NDX = \frac{R(\lambda_1) - R(\lambda_2)}{R(\lambda_1) + R(\lambda_2)}$$

東工大小杉研究室で提案してきた幾つかの例を表2に示す。まず、土壌水分比（単位重量の乾燥土に含まれる水分重量）の推定では、上式で $\lambda_1 = 1696\text{nm}$ 、 $\lambda_2 = 1426\text{nm}$ としたNDSMIが土壌水分比0～60%の範囲で良い近似を与える<sup>(4)</sup>。また、背景から人肌のみを抽出するNDHI（Normalized Difference Human Index）では、 $\lambda_1 = 1070\text{nm}$ 、 $\lambda_2 = 1550\text{nm}$ としたときに、種々の背景に対して人の肌が良好に抽出される<sup>(5)、(6)</sup>。写真1はこのような演算によりHS画像より抽出された人肌の例である。

我々がこの指標を発表してから2年後、米空軍研究所からほぼ同じ波長の組み合わせ（ $\lambda_1 = 1100\text{nm}$ 、 $\lambda_2 = 1400\text{nm}$ ）で同式を用いた評価がNormalized Difference Skin Index（NDSI）として発表されている<sup>(7)</sup>。

このような正規化演算は、 $\lambda_1 = 1460\text{nm}$ 、 $\lambda_2 = 1280\text{nm}$ とすることで森林植生の水ストレスを評価することができ、日本海沿岸の各県で大きな被害の発生している「ナラ枯れ」を検出する指標としても有効である<sup>(8)</sup>。

しかしながら、これらの指標では、実質的に二つのバンドの情報だけしか利用していないため、HSセンサから得られる情報の多くは捨てられてしまう。HSセンサから得られる情報を最大限に利用しようとした場合、全波長成分をニューラルネットワーク等の適応的な処理系に加え、学習によって処理を最適化することも可能ではあるが、HSセンサから得られる各波長間のデータには高い冗長性が含まれるため、Particle Swarm Optimization（PSO：粒子

表2 赤外領域で定義される正規化指標の例

観測対象	略号	$\lambda_1$ (nm)	$\lambda_2$ (nm)
土壌水分比 <sup>(4)</sup>	NDSMI	1696	1426
人肌検出 <sup>(5)、(6)</sup>	NDHI	1070	1550
ナラ枯れ検出 <sup>(8)</sup>	NDWI <sub>swir</sub>	1460	1280



写真1 NDHIにより抽出された人肌

群最適化) などを用いて抽出される有効バンド数は10前後に留まる<sup>(9)</sup>。

以下の路上障害物の判定では、処理の高速化を優先するという観点から、バンド数を最大5として処理系を構成する。

### 3. 路上障害物のスペクトルとその判別ロジック

路上で遭遇する代表的な対象物の短波長赤外領域での反射スペクトルを図1に示す。(a)の皮膚、(b)の植生、(c)の動物および衣類では、波長の短い側に比較的高い反射率が観測されるのに対し、無機物の自動車、コンクリート、

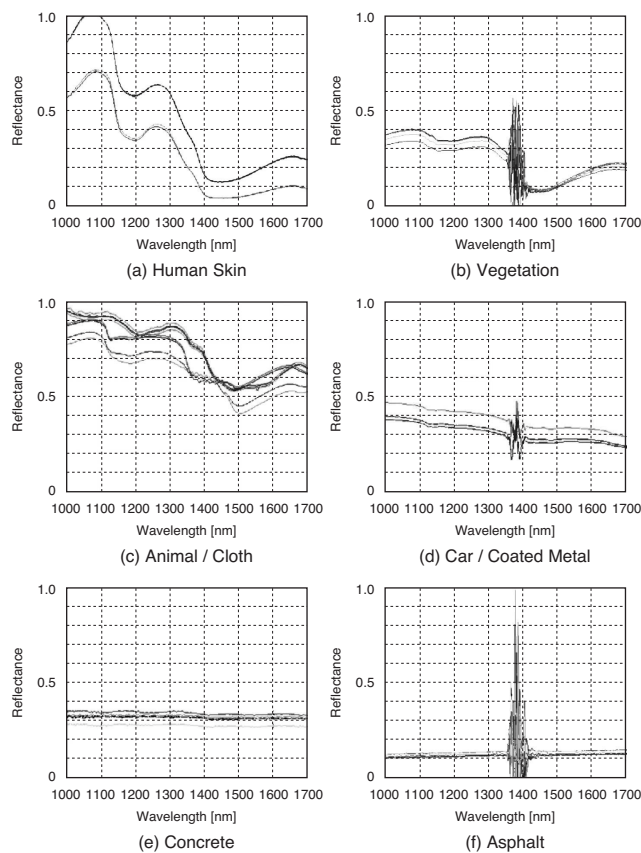
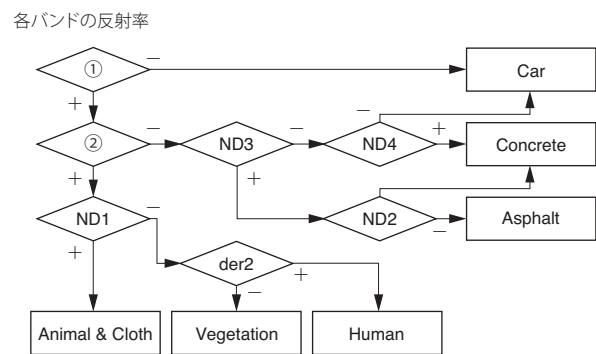


図1 代表的な路上対象物の短波長赤外域の反射スペクトル

アスファルトでは、全域にわたって比較的平坦な反射スペクトル傾向を持つ。なお、1380~1400nmには水蒸気の吸収帯があるため観測条件によっては白色板校正の際に大きな誤差を含むことになり、見かけ上反射率の分散が特異的に増大している。

このように水蒸気等の吸収帯を避けつつ、各対象物の特徴を良く表しているバンドとして、1100、1200、1300、1500、1600nmを選択し、多数の対象物について構築したスペクトルデータベースをもとに高速処理可能なロジックを決定した。このロジックによる処理の流れを図2に示す。

図2の処理系では、各対象物の輝度値を白色板の輝度値で正規化して得られる各バンドの反射率を入力とする。まず、比較演算①では五つの各バンドごとに、反射率を0.02と比較し、全バンドとも0.02以下であれば、自動車のガラス窓と判定し、Carに分類する。次いで②では1100、1300、1500nmの3バンドから得られる2次差分および二つの正規化演算指標ND3、ND5を用いた演算処理結果について正負の判定を行う。以下同様に、各種の正規化演算結果の正



(注)  
 ① 全バンドを閾値0.02と比較: 全て負の場合、自動車(ガラス窓)と判定  
 ②  $der1 \times (ND5 + ND3)$  の正負を判定  
 $der1$ : R1200, R1300, R1500による2次差分  
 $der2$ : R1100, R1200, R1500による2次差分の正負判定  
 $ND1$ :  $(R1500 - R1200) / (R1500 + R1200)$   
 $ND2$ :  $(R1300 - R1200) / (R1300 + R1200)$   
 $ND3$ :  $(R1600 - R1300) / (R1600 + R1300)$   
 $ND4$ :  $(R1300 - R1100) / (R1300 + R1100)$   
 $ND5$ :  $(R1500 - R1300) / (R1500 + R1300)$   
 R1100は波長1100nmにおける反射率、R1200は波長1200nmにおける反射率、R1300、R1500、R1600も同様の表記

図2 5バンドを用いた対象物判別処理アルゴリズム

表3 5バンドを用いた識別結果の混合行列

Classified Data	Reference Data						Row Total	User's Accuracy
	Hum	Veg.	Ani.	Car	Asp.	Con.		
Human skin	48						48	100%
Vegetation		20					20	100%
Animal/Cloth		2	103				105	98.1%
Car/Metal				34		3	37	91.9%
Asphalt					48	2	50	96.0%
Concrete					5	53	58	91.4%
Column Total	48	22	103	34	53	58	318	
Producer's Accuracy	100%	91.0%	100%	100%	90.6%	91.4%	(306/318)=	96.2%
	<b>Overall Accuracy</b>							

負にもとづき、コンクリート、アスファルト、動物および衣服、植生、人肌に分類の処理が行われる。318点の試料について、このような演算処理を行い、判定結果を評価した。評価結果を混合行列の形で表3に示す。表中、Producer's Accuracyは、例えば、植生と分かっている試料を22点分類器に与えたところ、91.3%が正しく植生と判定され、8.7%が誤って動物および衣類と判定されたことを意味する。User's Accuracyは未知の対象物を分類器に与え判定結果がアスファルトと出たとき、実際に現物を調査してみたところ96%は正しいアスファルトであったが、残り4%が実際はコンクリートであったことを意味する。

以上の結果を見ると、実際に人肌を与えた場合や、自動車を与えた場合には100%の精度で、それぞれの正しい判定をしていることが分かる(Producer's Accuracy)。しかしながら、コンクリートとアスファルトの判別においては、Producer's Accuracy、User's Accuracyともにやや低い値となっている。

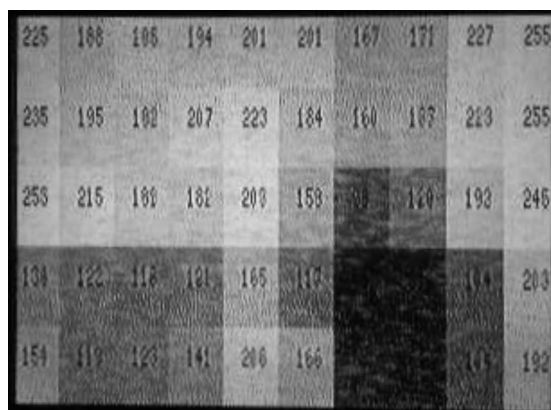
#### 4. 試作観測系

HS画像は通常、被写体に対して平行にラインセンサを機械的に走査することで2次元画像を取得する(push broom)方式を用いるか、あるいは2次元配列されたセンサ上加わる光の波長を透過波長可変のフィルタで濾波する方式が一般的であるが、いずれの方法でも走査に要する時間が無視できないため、高速の画像取得には適していない。前述のように、HSデータの中から、5バンド程度を選んだ場合にも対象物の認識精度は人や車輛の認識には高い精度が得られることから、本試作系では、図2のアルゴリズムで必要な5バンドのみの観測を高速で行う光学系を構成した。

この光学系の検知装置試作品を写真2に示す。センサから得られたビデオ信号はSIMD型プロセサ<sup>(1)</sup>に入力される。この処理系では64個ずつ2系統の処理内容、128個のデー



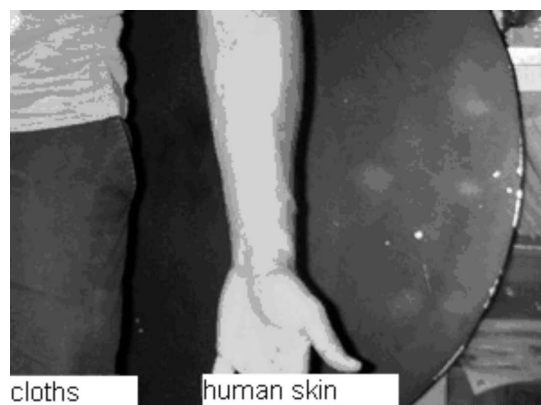
右端が赤外InGaAsセンサ  
写真2 試作センサの光学系



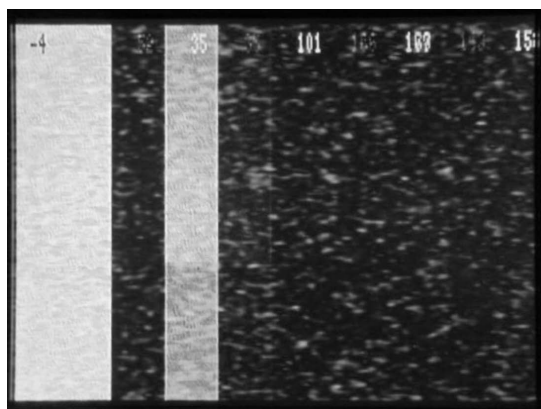
横方向：対象物の水平位置  
縦方向：各バンドの反射率×255  
写真3 画像前処理部モニタ画面

タについて画像の並列処理を行わせる。

写真3は画像前処理部の内容をモニタした画像で、水平方向は、対象物の水平位置を10分割した位置を、垂直方向には5つの各バンドごとに平均化した画素値を最大値255で数値および濃淡で表示している。



(a) 対象物のカメラ画像



(b) 検出結果画面

写真4 衣服および皮膚の実時間検出例

このように各バンドごと、各水平位置ブロックごとに整理された観測データは図2に示した処理系で高速処理され、演算結果は写真4のように、各水平位置のブロックに認識したい対象物があるか、否かを2値化して表示する。写真4の例は衣服および皮膚が存在するか否かについてオンライン処理した結果で、(1/30)秒のフレーム周波数で実時間検出が可能である。

## 5. 結 言

本稿では、歩行者を中心とした障害物検知・識別に利用可能な短波長赤外反射スペクトル情報をハイパースペクトルセンサで取得し、得られたデータベースをもとに、有効なスペクトル間の演算方式を提案する組み込みシステムへの実装を行うとともに、短波長赤外マルチバンドの観測光学系を構成し実時間で認識処理を実現した。本試作システムでは、2次元的な画像取得は行わないので、電動車椅子など、ローアングルからの観測を行う場合にも、プライバシーや良俗上の問題を惹き起こさないというメリットもある。現在まで、短波長赤外の情報が余り積極的には利用されてこなかったが、シリコン系の廉価なセンサの守備範囲を超えた波長帯のため、実用的なセンサの構成が困難であったことも短波長赤外が利用されてこなかった一因と考えられる。今後Ⅲ・Ⅴ族化合物半導体の技術的進展に伴い、この波長帯を用いたセンシング技術が一層進展するものと考えられる。

### 用語集

#### サポートベクターマシン (SVM)

各パターンクラスの境界に位置する少数のデータ (サポートベクトル) を用いて最適化を行うパターン分類器の一方式。

#### PGP分光器

回折格子を2枚のプリズムでサンドイッチ構造にした分光器。

#### ND3

$(R1600-R1300) / (R1600+R1300)$  で定義した正規化差分指標。

#### ND5

$(R1500-R1300) / (R1500+R1300)$  で定義した正規化差分指標。

#### NDX

正規化差分指標の一般形 (Xが観測対象により変わる)。

#### NDSMI

Normalized Difference Soil-Moisture Index

#### SIMD

Single Instruction Multi Data

### 参 考 文 献

- (1) 東久保政勝、栗田多喜男、「路車協調用画像センサの開発」SEIテクニカルレビュー、Vol.175, pp.108-112 (2009)
- (2) NASA&カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所、AVRIS <http://aviris.jpl.nasa.gov/>
- (3) (財)資源・環境観測センター、「ハイパープロジェクト」 <http://www.ersdac.or.jp/HYPER/index.html>
- (4) 福角雅徳、嶺川陽平、宇都有昭、小阪尚子、小杉幸夫、小田九二夫、斎藤元也、「ハイパースペクトルデータを用いた土壌水分推定における波長間演算の最適化」、システム農学会2006年秋季研究発表会抄録、pp.48-49 (2006)
- (5) 枝長孝幸、宇都有昭、小杉幸夫、「短波長赤外領域スペクトル情報を用いた人肌抽出に関する研究」、日本写真測量学会平成17年度秋季学術講演会 (2005)
- (6) 枝長孝幸、宇都有昭、小杉幸夫、「短波長赤外領域スペクトル情報を用いた人肌領域抽出に関する研究」、写真測量とリモートセンシング、Vol.46、No.2、pp.17-26 (2007)
- (7) Abel S. Nunez and Michael J. Mendenhall, "Detection of Human Skin in Near Infrared Hyperspectral Imagery," vol. II, pp.621-624, Proc. IGARSS 2008 (2008)
- (8) 小杉幸夫、宇都有昭、浅野太郎、菊地信輝、尾形俊成、小田川信哉、小田九二夫、「航空機搭載ハイパースペクトルセンサを用いたナラ枯れの観測と解析」、第120回日本森林学会抄録、G23 (2009)
- (9) Takayuki Edanaga, Yohei Minekawa, Sildomar T. Monteiro and Yukio Kosugi: "Studies on human skin extraction from hyperspectral data using particle swarm optimization", 写真測量とリモートセンシング、Vol.47, No.3, pp.23-36 (2008)
- (10) 浅野太郎、小杉幸夫、宇都有昭、村瀬亨、佐々木吾朗、森口雅弘、「赤外ハイパースペクトル情報を用いた路上障害物認識に関する基礎的検討」、日本写真測量学会年次学術講演会論文集、pp.65-68 (2009)
- (11) Taro Asano, Yukio Kosugi, Kuniaki Uto, Toru Murase, Toro Sasaki and Masahiro Moriguchi: "Discrimination of Obstacles on the Road Using Hyper-spectral Dada", Proc. ACRS (Beijing 2009)
- (12) Yoshihiro Fujita, Nobuyuki Yamashita, and Shinichiro Okazaki: "IMAP: Integrated Memory Array Processor - Toward a GIPS Order SIMD Processing LSI-", IEICE Trans. Electron, Vol. E76-C, No.7, pp.1144-1150 (1993)

執筆 者

---

小杉 幸夫\* : 東京工業大学大学院総合理工学研究科教授  
工学博士  
ニューラルネットワークを用いた医用画像  
や地理画像などの情報処理の研究に従事  
電子情報通信学会、IEEE、日本生体医工学  
会、計測自動制御学会、日本写真測量学会  
等各会員



村瀬 亨\* : 材料技術研究開発本部  
情報通信研究開発本部技師長  
安心安全ユビキタスワーキンググループ  
リーダー 工学博士  
スタンフォード大学客員研究員、カーネ  
ギーメロン大学 MACH 客員研究員、(独)科  
学技術振興機構 (JST) WG 審査担当を歴任  
(独)産業技術総合研究所評価部委員、システム制御情報学会  
理事、電子情報通信学会員



浅野 太郎 : 東京工業大学大学院総合理工学研究科 修士2年

宇都 有昭 : 東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教  
博士 (工学)

高岸 成典 : 研究統轄部企画部 主幹  
安心安全ユビキタスワーキンググループ 工学博士

森口 雅弘 : 研究統轄部企画部 主席  
安心安全ユビキタスワーキンググループ

---

\*主執筆 者