

## 鉱山用重機間通信による周辺重機検出手法の提案

長船 辰昭<sup>1,a)</sup> 西村 友佑<sup>2,b)</sup> 加藤 聖也<sup>1,c)</sup> 廣森 聡仁<sup>2,d)</sup> 山口 弘純<sup>2,e)</sup> 東野 輝夫<sup>2,f)</sup>

受付日 2016年4月7日, 採録日 2016年10月4日

**概要:** 露天掘り鉱山での作業で用いられる重機は非常に巨大である。また、運転席は高い位置に存在するため、運転席からの視界は非常に狭く、運転手は他の重機の接近を目視で把握しにくい状況に晒されている。このような状況は、重大な事故を引き起こす原因の1つとなっており、他の重機の接近など、周囲の状況を適切に把握できることが求められる。他の車両の存在を把握する手段として、車車間通信を用いるアプローチがあげられるが、一般道を走行する乗用車を対象とした研究は行われているものの、巨大な重機や、段差のある鉱山特有地形を対象とする車車間通信の研究は行われていない。本研究では、露天掘り鉱山において、鉱山用重機間の車車間通信により、周辺に存在する重機の存在を把握する手法を提案する。提案手法では、まず、鉱山用重機周辺の電波伝搬モデルをレイトレース法を用いて作成するとともに、その正当性を示すために、モデルから得られる電波強度と、実際の重機に装着したアンテナによる電波強度の比較を行った。また、すり鉢状の鉱山特有の地形をモデル化し、重機間の位置関係やアンテナの設置位置を基に、シミュレーション実験において、上記電波伝搬モデルにより、電波強度を推定した。この実験結果において、露天掘り鉱山内での巨大重機を対象とした車車間通信では、自車に接近する鉱山用重機の存在の検知は可能である一方、自車から遠ざかる方向へ走行している鉱山用重機との通信は不可能な場合があり、鉱山用重機の存在の検知が不可能な領域を明らかにできることを示した。

キーワード：鉱山用重機、車車間通信、電波伝搬、レイトレース法、接近検知、露天掘り鉱山、Wi-Fi

## Vehicle Proximity Awareness by Inter-vehicle Communication for Surface Mine Operation Safety

TATSUAKI OSAFUNE<sup>1,a)</sup> YUSUKE NISHIMURA<sup>2,b)</sup> SEIYA KATO<sup>1,c)</sup> AKIHITO HIROMORI<sup>2,d)</sup>  
HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>2,e)</sup> TERUO HIGASHINO<sup>2,f)</sup>

Received: April 7, 2016, Accepted: October 4, 2016

**Abstract:** In surface mine environment, the size of mining equipment is typically very huge. Therefore, the sight of equipment operators in high-mounted cockpits is severely limited and those operators are often unaware of the approaching or nearby vehicles. It is reported that this unawareness causes serious accidents, which motivates us for proximity detection of those vehicles. Inter-Vehicle Communication (IVC) is a promising approach in road transport environment, but is not directly applicable to mining vehicles due to different features of radio propagation affected by huge bodies and terrain. In this paper, we propose a method that leverages IVC to support drivers' awareness in surface mine. The idea is that we build a radio propagation model for haul trucks, which are the most typical vehicles in surface mine, by accurate ray-tracing. The model is validated in the field experiment, where actual radio signal propagation is measured and compared with the model. Then a mining environment, where steep cliffs due to excavation are often seen, is modeled and a function is designed to estimate the received signal strength based on the locations of haul trucks and antenna locations. As a result, we have shown that our function can point out several blind spots in such environment, which is significant for V2V proximity detection in surface mine.

**Keywords:** haul truck, inter vehicle communication, radio propagation, ray tracing, safety operation, surface mine, Wi-Fi

## 1. 序論

鉱山における安全確保は欠かせないものであり、その取り組みの1つとして、Earth Moving Equipment Safety Round Table (EMERST) があげられる。EMERSTは主要な鉱山会社により2006年に設立された組織であり、安全性に関するリスクを最小化できるよう、最新の業務事例の共有およびその適用を目的としている。また、米国労働省のMine Safety and Health Administration (MSHA)は、鉱山における死亡事故、疾病、怪我を防止するため、露天掘り鉱山における安全基準をまとめ、安全性の向上を図っている[11]。しかしながら、事故の多くは、労働者の疲労や不注意などのミスにより引き起こされており、安全規則や安全基準だけで、様々な事故を防ぐことが困難である。このような事故の要因として、鉱山で稼働する重機が非常に大きく、運転手が周辺の状況を十分に把握できないことがあげられる。たとえば、10tの積載が可能なトラックの場合、長さ7.6m、幅2.5m、高さ3.3m程度の大きさである一方、露天掘り鉱山で使われる大型のダンプトラックでは、長さ15.5m、幅9.6m、高さ7.5mにも及ぶ。そのため、ダンプトラックの周辺には運転手から見通せない、いわゆるブラインドスポットが少なからず存在し、運転手にとって、周辺の状況をつねに認識することは困難である。また、重機の大きさだけでなく、鉱山の過酷な環境も、運転手の認識を妨げる要因となっている。たとえば、砂埃により視界を遮られたり、深い霧によって見通しが悪くなったりする状況がしばしば発生し、最も厳しい状況下では、見通し距離が10m~20m程度となり、巨大な重機の運転が通常にも増して危険なものとなっている。過酷な環境が様々な種類の事故を引き起こす事例がいくつか報告されており[8], [14], [15]、重機と周囲の労働者や乗用車との接触事故だけでなく、重機どうしの衝突事故も発生しており、特に巨大な重機間の衝突は図1のような凄惨な結果をもたらす。

重機と周囲の労働者との接触を防止するため、RF-IDやミリ波を用いた警報システムが開発されている[16], [17]。しかしながら、RF-IDやミリ波の検知距離は10~20m程度であるため、両者ともに重機間の衝突を検知するには不適である。加えて、携帯電話網における通信やセンサの検知で車両位置を把握し、車両位置を無線通信で通知するシステ



図1 鉱山用大型重機どうしの衝突事故現場 [1], [8]

Fig. 1 Collision accident scene [1], [8].

ムも開発されている[9], [12], [13], [20], [21], [22], [24], [25]。これらのシステムは、比較的小規模な鉱山で効果的であるが、大規模な鉱山に適用するには、鉱山全体を網羅するために必要となる、基地局やセンサの設置やメンテナンスが課題となる。これらの方式に比べ、車車間通信は、無線通信範囲内であれば車両間での直接通信により互いの位置情報を交換することができ、車両にのみ通信機器を装着する手法であるため、その導入およびメンテナンスの費用対効果が高い、有望なアプローチであると考えられる。なお、市販の自動車ではレーダなどの測距デバイスやカメラによる衝突事故防止装置が装備されつつあるが、車車間通信は、深い霧や砂塵などにより見通しが悪く、そういったデバイスがうまく作動しない天候や、さらに、高低差が存在する鉱山特有の道路環境における車両認識が可能である。鉱山を運営する企業では、実際に2.4GHzのWi-Fiのアンテナをダンプトラックに搭載しており、アクセスポイントを介して情報共有がなされている。一方、重機どうしが直接通信する車車間通信は、通常的車車間通信とは環境が大きく異っているため、必ずしも従来の知見を活用できるわけではない。まず、重機本体が巨大な鉄の塊であり、電波伝搬に強く影響することが想定され、たとえば、車両間の相対的な位置やアンテナ搭載位置により、通信品質が大きく変化することが考えられる。また、鉱山の地形は、都市の地形とは大きく異なり、すり鉢状の地形の中に階段状の道路が敷設されており、異なる段の道路はT字路やヘアピンカーブ上で接続されている。そのため、異なる段差を通行する車両間の高度差によって生じる電波遮蔽や、切り立った崖が電波伝搬へ及ぼす影響を考慮する必要がある。

本取り組みでは、費用対効果やメンテナンス性が高いWi-Fiをベースとした車車間通信により、露天掘り鉱山におけるダンプトラックの運転手の状況把握を支援するために、鉱山における最も典型的な車両である運搬トラックを対象とした電波伝搬モデルを構築する。また、この電波伝搬モデルを実測値と比較することでその妥当性を検証するとともに、掘削のために切り立った崖を鉱山環境のモデルとし、シミュレーション実験により、車両間の相対位置やアンテナ設置位置による受信電波強度を計測する。このシミュレーションの結果から、自車へ接近する方向に走行している鉱山用重機の検知は可能である一方、自車から遠ざ

<sup>1</sup> 日立製作所  
Research & Development Group Hitachi, Ltd., Minato,  
Tokyo 107-6323, Japan

<sup>2</sup> 大阪大学  
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

a) tatsuaki.osafune.uv@hitachi.com

b) y-nishimura@ist.osaka-u.ac.jp

c) seiya.kato.bn@hitachi.com

d) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp

e) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

f) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

かる方向へ方向に走行している鉱山用重機の検知は不可能な場合があるという結果が得られた。

## 2. 関連研究

### 2.1 近接警告システム

1章で述べたように、従来より、運転手の安全を確保するための安全基準が規定されているが、これらは人的なミスや極端な環境下では、有効に機能しないことが示されている [10]。一方、信頼性の高い警報システムを構築する取り組みの1つとして、計画されたルートからの逸脱や速度超過を検知する研究がなされている [6], [12], [20], [21], [24]。たとえば、Google Earth を用いて、鉱山機器の操作を支援するシステム [6], [20], [21] が提案されており、これらのシステムでは、GPS デバイスによって取得された露天掘り鉱山機器の位置情報が、鉱山内に設置された基地局からなる無線メッシュネットワークで共有され、3D 地図上に表示される。別の取り組み [12] では、基準となるポリ塩化ビニル製のポールを路側に設置し、ポールとの相対距離をレーザーにより計測することで、機器の位置を高精度に検出するシステムが提案されている。また、433 MHz 帯の通信を利用し、10~20 m 以内の車両、人、物を検知し、鉱山機器の操縦者に対して警報を発する取り組みもなされている [24]。文献 [6], [12], [20], [21] のシステムでは、基地局やポリ塩化ビニルポールのような屋外のインフラ設備が必要となるため、鉱山のような過酷な環境下では、導入およびメンテナンスコストが無視できないものとなる。文献 [24] は、本取り組みで利用する無線通信によるアドホックネットワークに加え、ポリ塩化ビニルポール、ドライバ向け警報装置、フリート管理システムから構成される包括的な安全支援システムを提案している。しかしながら、鉱山内のどのような領域においても信頼性の高い無線通信が行えるものと仮定しており、3章で述べているような、重機本体や道路側面の崖による電波の反射、遮蔽など、露天掘り鉱山特有の環境が電波に与える影響を考慮していない。

### 2.2 車車間通信の電波伝搬モデル

文献 [23] で論じられているように、車車間通信モデルは (i) 地形情報を用いた決定論的モデル [5], (ii) 地形情報を用いた確率論的モデル [2], (iii) 地形情報を用いない確率論的モデル [18] の3種類に分類される。文献 [5] では、周辺車両のような移動物体とともに、ビルや街路樹のような静止物体の外形など、地形情報を用いる車車間通信の電波伝搬モデルを提案している。このモデルにおいては、見通しのあるリンクと見通しのないリンクの2種類の通信リンクにおいて、大規模な電波強度変動は決定論的に計算するとともに、小規模な電波強度変動は周辺に存在する物体の数に依存して確率論的に計算する手法を採用している。文献 [2] では、時間的に変化する受信信号の包絡線と位相、複素包

絡線のパワースペクトルの確率分布を求めることにより、都市における移動物体の電波伝搬を確率論的にモデル化しており、ある特定の方位角の範囲に存在する建物が原因で生じる電波の散乱、反射を考慮した無線チャネルの伝達関数を求めている。一方、文献 [18] では、実際に車両を走行させ、実環境下で通信を行い、車両間の通信状況を測定し、それらの測定結果に基づいて、都市空間内の様々な状況における車両間の電波伝搬状況モデルを構築している。

### 2.3 本研究の位置づけ

本研究の目的は、一般に普及している Wi-Fi の電波伝搬において、ダンプトラック（以降、ダンプトラックを鉱山用重機と表記する）の車体と、鉱山特有地形が与える影響を考慮した電波伝搬モデルの設計手法を確立し、鉱山用重機間通信における通信可否領域を把握し、周辺の重機の存在を把握できる領域と把握できない領域を明らかにすることで、鉱山における安全性向上を実現することにある。上記の文献はいずれも乗用車を対象とした電波伝搬モデルを扱ったものである。乗用車の典型的なサイズは、4.5 m × 1.8 m × 1.5 m 程度である一方、鉱山における鉱山用重機はおおよそ 15 m × 10 m × 8 m にも及び、体積にして乗用車の 80 倍の大きさである。また、鉱山における地理的環境は都市のそれと著しく異なるため、従来とは異なる取り組みが求められる。本取り組みでは、鉱山環境における電波伝搬モデルを構築するとともに、Wi-Fi による車車間通信の有用性および制約をシミュレーション実験により明らかにする。

## 3. 鉱山環境下の車車間通信の特性とモデルのパラメータ

本章では、鉱山環境下における車車間通信の電波伝搬の特性と、考慮すべき要因について述べる。まず、鉱山用重機自体が電波伝搬に与える影響を考える。鉱山では様々な種類の重機が用いられるが、本研究では、図 2 に示すような鉱山用重機間の通信を対象とする。このような鉱山用重機は車両本体やその積載物は電波の遮蔽物となり、電波の



図 2 鉱物が積載されている重機

Fig. 2 Haul truck with payload.



回折, 反射, 減衰を生じさせる要因となる. 特に, 積載物は図 2 に示すように, 重機の屋根の位置よりも高く積載される場合があるため, 積載物の有無は電波伝搬に大きな影響を与える. その結果, 鉱山用重機に取り付けるアンテナ自体は無指向性であっても, 鉱山用重機全体を電波放射物と見なしたアンテナは指向性を持ち, この指向性は通信重機間のアンテナの位置関係やアンテナの設置位置に依存して変化する. また, 乗用車や軽車両とは異なり, アンテナの設置できる位置は限られる. たとえば, 重機の後方には鉱物を積載するため, 重機の左前方にアンテナを設置したものが多く (図 3). 以上のことから, 鉱山用重機については, 積載物の有無, アンテナ位置を電波伝搬に影響を与える要因として考える.

次に, 鉱山特有の崖や段差を含む地形が電波伝搬に与える影響について述べる. 地下深くの鉱物を採掘するために, 露天掘り鉱山の地形は, 全体的にすり鉢のような形状をしており, 重機が作業および移動を行う道路はそのすり鉢状の地形の中に階段状に設置されている. 典型的な露天掘り鉱山の設計基準書 [7] によると, 隣接する段の道路との高低差はおおよそ 15m であり, この高さは巨大重機の全高よりも高く, 4~5 階建のビルの高さに相当し, 段差ごとに存在する崖の傾斜角は最大 75° になるため, 電波伝搬において地形の影響は無視できない. 鉱山用重機が関わる事故の一例として, 他の重機の走行経路の逸脱やトラブルが原因で, 道路の接続部分での衝突事故や上の段から重機が滑り落ち, 自車に衝突する事故があげられる. このような潜在的な危険を, 事前に運転手に警告することは必要不可欠であることから, 異なる段に位置する重機間の通信に対しての電波伝搬を考慮することが求められる. 以上のことから, 鉱山特有の地形そのものだけでなく, その環境下においての重機間の位置を電波伝搬に影響を与える要因として考える.



図 3 左前にアンテナを取り付けた重機

Fig. 3 Haul truck with antenna at left-front position.

#### 4. 電波伝搬モデルの設計

重機本体や積載物による反射や回折のために, 鉱山用重機に取り付けられたアンテナから発せられる電波の伝搬経路は変化する. そのため, アンテナ自体は無指向性であるが, そのアンテナを装着した鉱山用重機全体は, 指向性を持った仮想的なアンテナと見なすことができる. 本研究では, この仮想的なアンテナを重機アンテナモデルとよび, その周辺の電波伝搬をレイトレース法を用いて解析することによって, 重機アンテナモデルを構築する. また, 鉱山特有の環境を考慮するために, アンテナの設置位置や積載物の存在を考慮したシミュレーション実験を実施する. シミュレーション実験では, ネットワークシミュレータ Scenargie [19] 上で, その機能の 1 つである High Fidelity Module を利用し, レイトレースによる電波伝搬解析を行った. Scenargie は現実的な環境を想定した無線通信の解析および設計を可能にするフレームワークであり, 大規模かつ複雑なシステムを対象とした無線通信の評価を行うことができる.

##### 4.1 レイトレースによる重機アンテナモデルの構築

本研究で対象としている鉱山用重機の車両寸法を表 1 に示す. まず, 3D モデリングツール Blender [4] を用いて, 表 1 に示した車両寸法に従い, 積載物を考慮した鉱山用重機の 3D モデルを作成した (図 4). 図 4 に示されているように, 鉱山用重機の車体表面の細かな形状が電波伝搬に与える影響は非常に小さいため, 鉱山用重機の 3D モデルは直方体の組合せから構成されている. なお, 積載物は鉱山

表 1 想定する重機と積載物

Table 1 Haul track and materials.

Size	15.49 m length × 9.6 m width × 7.52 m Height
Material	iron
Payload	iron
Payload Height	rooftop+2 m

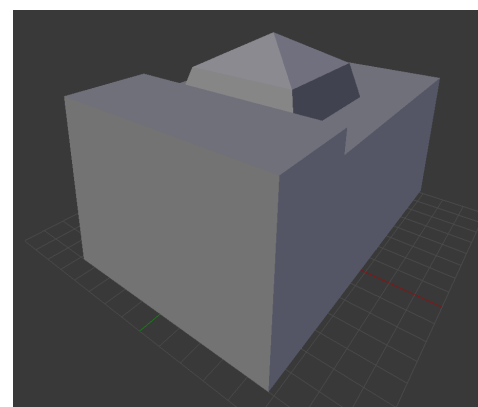


図 4 重機の 3D モデル

Fig. 4 3D CAD model of haul truck.

表 2 アンテナの規格

Table 2 Antenna specification.

Protocol	IEEE802.11g
Directional Type	Omni
Tx Power	50 mW (17 dBm)
Rooftop	ground+8.0 m

用重機の高さより高く積載され、その最高点は、鉱山用重機の屋根から高さ 2m に位置するものと仮定し、積載物の 3D モデルは多面体を用いて構築した。鉱山用重機に取り付けるアンテナの規格は表 2 に示すもので、世界の各地域で使用することを想定し、2.4 GHz 用の無指向性アンテナを用い、出力電力 50mW (17 dBm) により、IEEE 802.11g で通信するものとする。アンテナの設置位置は、鉱山の現場の状況や重機の形状を考慮し、実用的な設定として、左前方と中央前方の 2 カ所を対象とし、その高さは、鉱山用重機の屋根の上、地上から 8.0 m の高さに設置する。なお、アンテナの個数は 1 つとする。重機本体や積載物による電波遮蔽の影響を小さくするために、重機の前方向と後方にアンテナを設置するといった、複数のアンテナを設置した環境については、前述のように重機の形状や重機を用いる鉱物の積み下ろし作業の都合上、実用的な環境ではないため、本論文では考慮しない。これらの環境の下での重機アンテナモデルの放射指向特性を求めるため、重機や積載物による電波伝搬の障害を考慮したレイトレースによる電波伝搬モデルと、障害物を考慮しない自由空間伝搬損失モデルを採用した場合の 2 種類の電波伝搬モデルを用いたときの電波強度を測定し、重機アンテナモデルの各放射方向におけるゲインを求める。レイトレースによって得られる電波強度を  $RSSI_H$ 、障害物を考慮しない自由空間伝搬損失モデルによって得られる電波強度を  $RSSI_F$  で表すと、ゲイン  $G$  は  $RSSI_H - RSSI_F$  として得られる。アンテナの設置位置を左前方としたとき、鉱山用重機の中心から 15m 離れた場所の各放射方向における  $RSSI_H$  を、図 5 に示す。鉱山用重機の進行方向を  $0^\circ$  の方向とし、角度の軸は反時計回りを正とする。赤線は  $RSSI_H$  を示し、赤線が円の外側に位置するほど、電波強度が強いことを表している。重機の右側前方にあたる  $280^\circ \sim 360^\circ$  の方向、左側の領域にあたる  $0^\circ \sim 160^\circ$  の方向では、重機本体が電波に及ぼす影響はきわめて小さいため、 $RSSI_H$  が  $-50 \text{ dBm} \sim -40 \text{ dBm}$  の範囲に分布している。一方、重機の右側後方にあたる  $190^\circ \sim 260^\circ$  の方向では、 $RSSI_H$  は  $-88 \text{ dBm} \sim -70 \text{ dBm}$  の範囲に分布しており、重機本体による電波遮蔽の影響のため、重機の右側前方、左側の方向と比べて 20 dBm 程度電波強度が低下していることが分かる。

4.2 実測値との比較

重機アンテナモデルから得られる電波強度の特性と、鉱

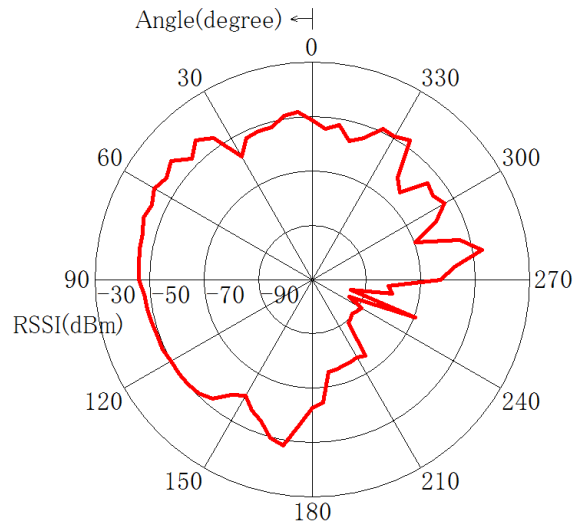


図 5 重機アンテナモデルの放射指向特性

Fig. 5 Received signal strength by simulation using antenna pattern.

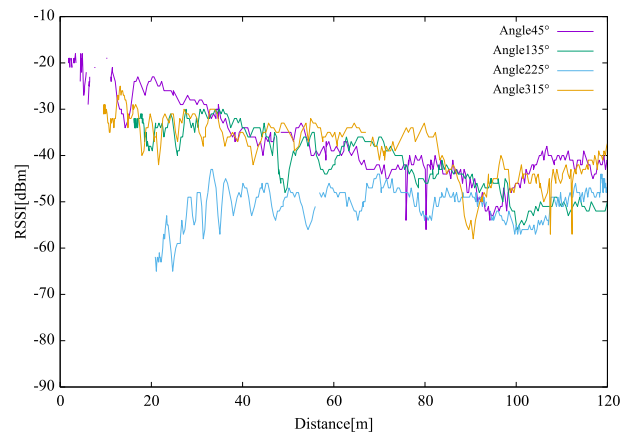


図 6 実測値の距離対電波強度特性

Fig. 6 Received signal strength by real measurement.

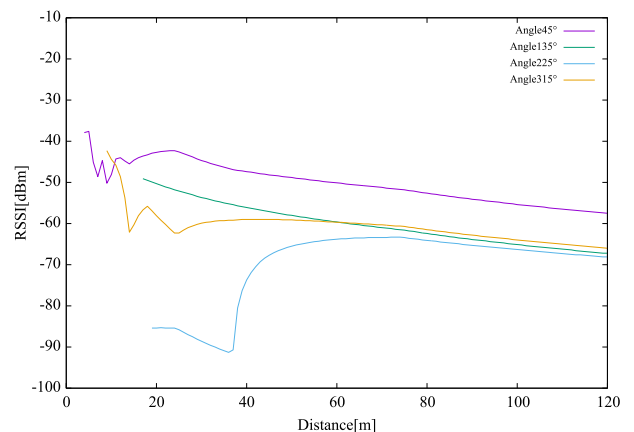


図 7 重機アンテナモデルの距離対電波強度特性

Fig. 7 Received signal strength by simulation.

山用重機にアンテナを設置したときに得られる実環境における電波強度の特性との比較を行う。実環境における電波強度の計測においては、鉱山用重機の左前方にアンテナ

を設置し、Bitrieve社のAirPcap[3]によりRSSIを測定した。45°, 135°, 225°, 315°の方向ごとに、アンテナからの距離に対し、実測したRSSI, シミュレーション上で計測されたRSSIを、図6, 図7に示す。図6に示した実測値の結果では、RSSIがスパイク波形のように急激に変化しているが、これは電波の受信強度が時間とともに変動するフェージング現象の影響によるものである。図7に示されるように、シミュレーションでは、重機アンテナモデルの放射指向特性を正確に把握できるように、フェージング現象は考慮していないため、RSSIは変動していない。また、アンテナからの距離が40mよりも小さい場合には、アンテナの設置位置と対角方向となる225°の方向におけるRSSIは、重機本体による電波遮蔽の影響を受けるため、他の方向のRSSIと比較して30~40dBmほど低下する傾向にある。アンテナからの距離が80m以上である場合には、鉱山用重機本体の電波に与える影響が弱まり、その差は最大約10dBm程度まで縮まる傾向にある。このような傾向が実測値とシミュレーションの結果の両方に見られるため、シミュレーションによって得られた $RSSI_H$ は、図6に示した実測値 $RSSI_A$ の傾向を再現しており、重機アンテナモデルは実際の環境を表現したモデルであるといえる。

### 5. 仮想鉱山内での通信可否領域の推定

本章では、4章で設計した重機アンテナモデルを利用し、鉱山の3D地形モデル上において、2つの重機間の通信が可能な領域と通信が不可能な領域を推定する。

鉱山の3D地形モデルは、一般的な露天掘り鉱山の道路設計基準[7]を参考に、露天掘り鉱山の典型的な地形を模したすり鉢状のモデルを作成した。鉱山用重機がすれ違う場所で特に衝突事故が生じやすい、階段状の道路の接続部分周辺での通信可否領域の推定を行うため、チリの主要銅鉱山Chuquicamataの地形を参考に、高低差のあるT字路の3D地形モデルを作成した。仮想鉱山内の段差は3段とし、図10に示す円形の最下層を0段目と見なし、各段差をそれぞれ1段目、2段目、3段目とする。1段目、2段目については、鉱物の採掘を進めていく過程で生じる段差であり、重機が通行する道路ではないため、鉱山用重機は最下層と3段目のみに配置する。参考にした鉱山の設計図、航空写真を図8, 図9に、作成した3D地形モデルを図10, 図11に示す。図9の航空写真においては、薄黒く轍の跡が見られる部分が鉱山用重機が走行する道路であり、図の上方に、階段状の道路の接続部分となるT字路の交差点が存在することが分かる。その他の部分は、図の右側の標高が高く、左側の標高が低い形で崖になっている。

アンテナの設置位置、鉱山用重機の進行方向、鉱山道路のカーブの曲率の違いが、通信可否領域の推定に与える影響を把握するために、図10の仮想鉱山を対象とし、自車(鉱山用重機1)を仮想鉱山の最下層に固定し、通信相手と

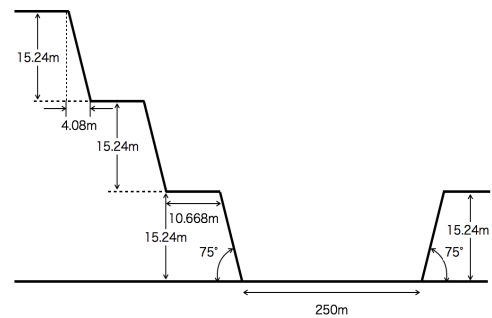


図8 仮想鉱山道路の設計図

Fig. 8 Road structure.



図9 衝突事故が生じやすい箇所の航空写真

Fig. 9 Open pit mine aerial photograph.

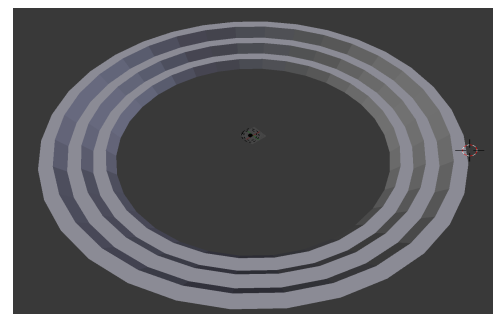


図10 仮想鉱山の3Dモデル

Fig. 10 3D terrain model.

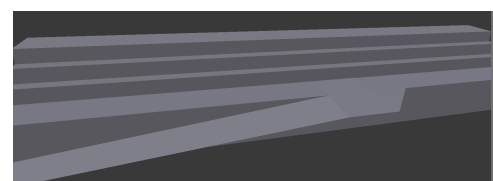


図11 衝突事故が生じやすい地形の3Dモデル

Fig. 11 3D terrain model.

なる他車(鉱山用重機2)を、最下層と3段目の道路に配置し、15mの間隔を空けて順次移動させ、2つの重機間の通信時におけるRSSIを、シミュレーションによって算出し、通信可否領域の推定を行った。最下層に固定する鉱山用重機1が上方と下方の2種類、アンテナの設置位置は左前方と中央前方の2種類、通信を行う2つの鉱山用重機の進行方向は、同方向と互いに異なる方向の2種類、カーブの曲率も同様に、1/125と1/250の2種類とした。なお、



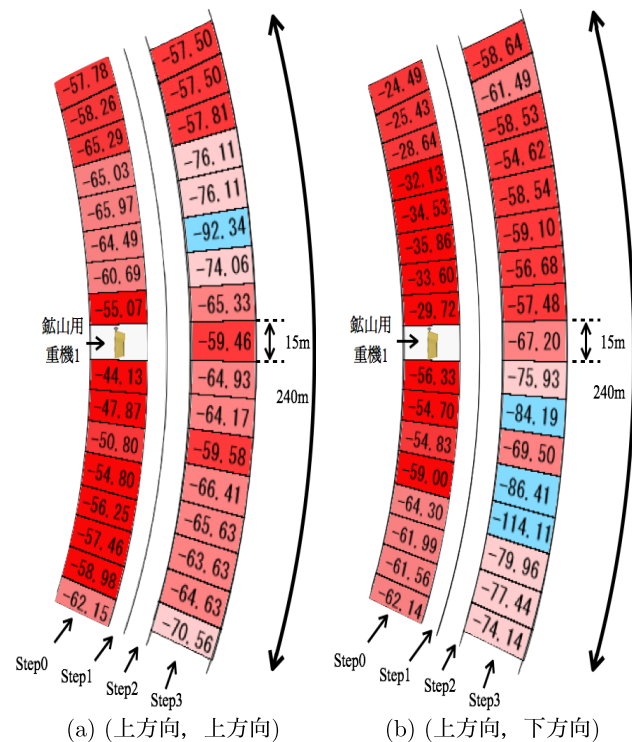


図 12 通信可否領域推定結果 (アンテナ設置位置左前方, 曲率 1/125 の場合)

Fig. 12 RSS estimation by our function (Antenna at left-front position, Curvature 1/125).

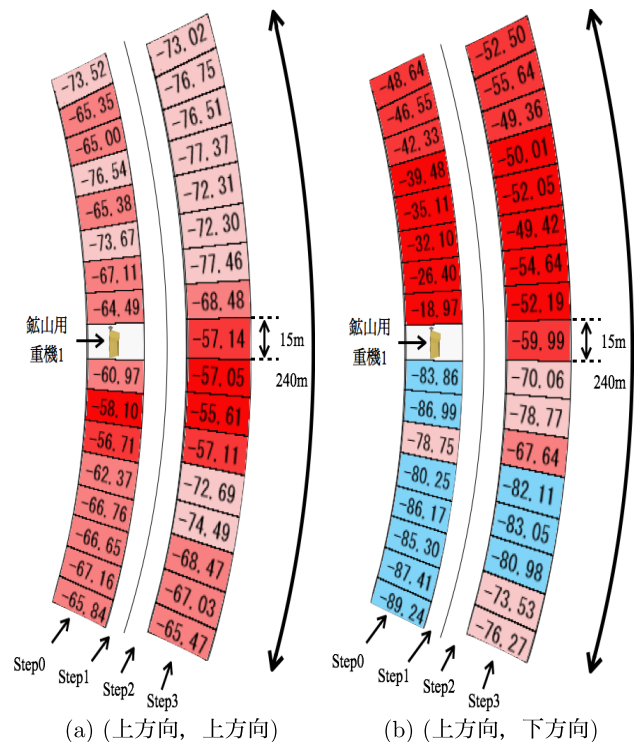


図 13 通信可否領域推定結果 (アンテナ設置位置中央前方, 曲率 1/125 の場合)

Fig. 13 RSS estimation by our function (Antenna at middle-front position, Curvature 1/125).

アンテナの設置位置が中央前方の場合は、鉦山用重機 1 の向きによって、段差のある道路の壁面とアンテナの位置関係は変化せず、通信可否領域は鉦山用重機 1 が上方向の環境の結果と対称になるため、鉦山用重機 1 が下方向かつアンテナの設置位置が中央前方のケースは実験環境には含まれない。したがってこれら実験環境の組合せは全 12 通りとなる。

これらの環境における通信可否領域の推定結果を図 12, 図 13, 図 14, 図 15, 図 16 に示す。なお、図のサブタイトルは、(鉦山用重機 1 の向き, 鉦山用重機 2 の向き) を表している。

通信時の RSSI が閾値以上となる領域を通信可能な領域とし、閾値未満となる領域を通信不可能な領域としている。本論文では、文献 [26] を参考に、IEEE802.11g デバイスが、おおよそ数十 Mbps で安定して通信できる電界強度である  $-80$  dBm を通信可否判定の閾値とした。なお、実環境では図 6 で示したようにフェージングの影響によって電波強度の変動は大きくなるが、同じ地点で複数回の測定を行い、その平均値を基に通信可否領域を推定することを想定しているため、フェージングが閾値による通信可否領域の判定に与える影響は小さい。図中の各ボックス内の数値は 2 つの重機間の通信時の RSSI を示しており、RSSI の値が  $-60$  dBm 以上となる領域は赤色、 $-70$  dBm 以上  $-60$  dBm 未満の領域はピンク色、 $-80$  dBm 以上  $-70$  dBm 未満の領

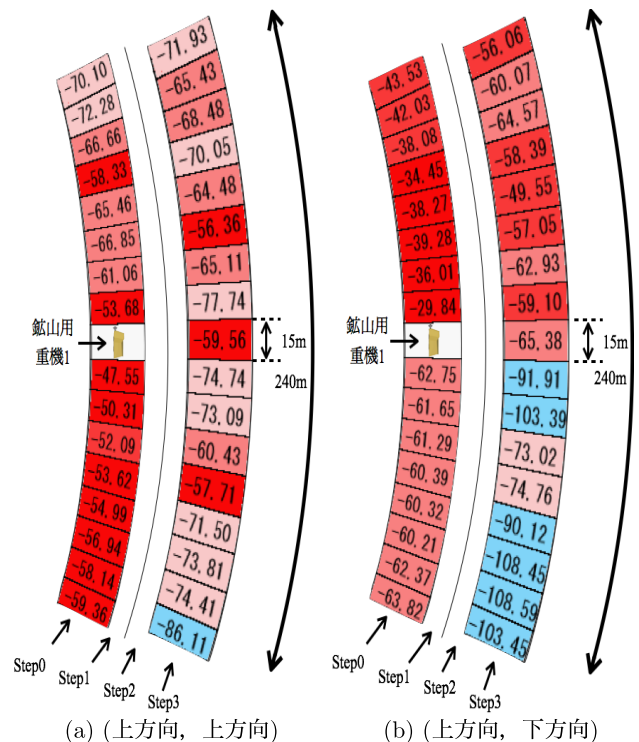


図 14 通信可否領域推定結果 (アンテナ設置位置左前方, 曲率 1/250 の場合)

Fig. 14 RSS estimation by our function (Antenna at left-front position, Curvature 1/250).

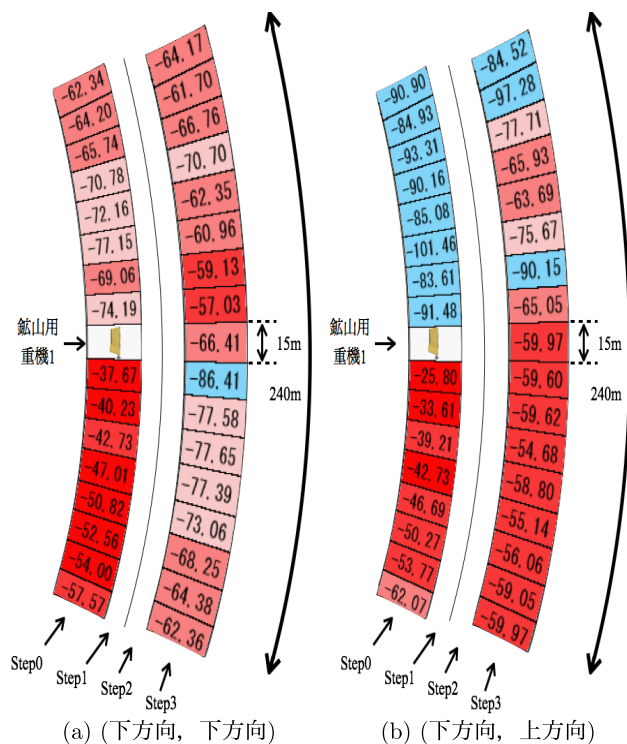


図 15 通信可否領域推定結果 (アンテナ設置位置左前方, 曲率 1/125 の場合)

Fig. 15 RSS estimation by our function (Antenna at left-front position, Curvature 1/125).

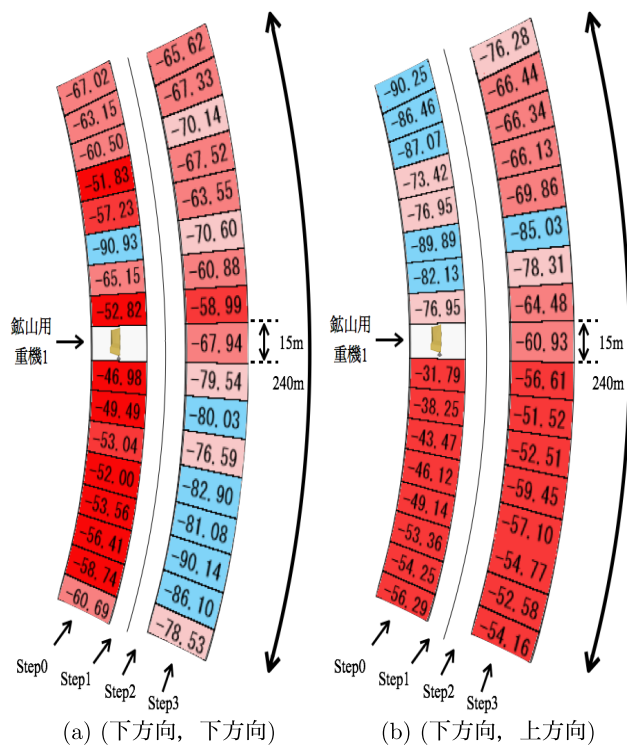


図 16 通信可否領域推定結果 (アンテナ設置位置左前方, 曲率 1/250 の場合)

Fig. 16 RSS estimation by our function (Antenna at left-front position, Curvature 1/250).

域は薄いピンク色, 通信不可能な領域となる  $-80$  dBm 未満の領域は水色で色分けしている.

図 12 は, アンテナの設置位置を左前方, カーブの曲率を  $1/125$  とした環境の推定結果を示している. この結果より, 最下層の道路には, 通信不可能な領域は存在しないものの, 3 段目の道路において, 通信不可能な領域が存在することが分かる. また, 図 12 (b) に示したように, 鉦山用重機 1 が上方向, 鉦山用重機 2 が下方向である場合, 重機に取り付けられたアンテナ間の距離が大きくなるとともに, 鉦山用重機本体による電波遮蔽の影響が大きくなるため, 鉦山用重機の進行方向が同方向の場合と比べて通信不可能な領域が増加する傾向がある.

図 13 は, アンテナの設置位置を中央前方, カーブの曲率を  $1/125$  とした環境の推定結果を示している. アンテナの設置位置を左前方とした環境と比較すると, 電波強度が全体的に弱まっているが, 進行方向が同じである場合には, 通信不可能な領域は存在しないことが分かる. 一方, 進行方向が互いに異なる場合, 鉦山用重機 1 の後方の領域は, 通信不可能な領域が大半を占め, 後方に位置する車両とはほとんどの場所において通信できないという結果が示されている.

図 14 は, アンテナの設置位置を左前方, カーブの曲率を  $1/250$  としたケースの結果を示している. 進行方向が同じ向きするとき, 3 段目の道路において, 鉦山用重機 1 の右側後方に通信不可能な領域が存在し, 進行方向が異なる場合については, 右側後方は通信不可能な領域が多数を占めている. また, アンテナの設置位置を中央前方, カーブの曲率を  $1/250$  としたケースにおいては, アンテナの設置位置を中央前方, カーブの曲率を  $1/125$  としたケースと同様の傾向が見られたが, 鉦山用重機 1 の後方の領域に存在する通信不可能な領域はやや減少した.

図 15 は, アンテナの設置位置を左前方, カーブの曲率を  $1/125$  とし, 鉦山用重機 1 が下方向の環境の推定結果を示している. 鉦山用重機 1 を下方向に設置したことによって, 道路の壁面とアンテナが近づき, 崖による電波遮蔽の影響が大きくなり, 3 段目の道路の領域における電波強度が全体的に弱まる傾向がある. また, 進行方向が異なる場合には, 鉦山用重機 1 の後方の領域は, 重機の積載物による電波遮蔽の影響が大きくなるため, 通信不可能な領域が多数を占める.

図 16 は, アンテナの設置位置を左前方, カーブの曲率を  $1/250$  とし, 鉦山用重機 1 が下方向の環境の推定結果を示している. カーブの曲率を  $1/125$  とした図 15 の結果と比較すると, 鉦山用重機の進行方向が同じ場合, 鉦山用重機 1 の後方の最下層の道路の領域の電波強度は強くなり, 鉦山用重機 1 の前方の 3 段目の道路の領域の電波強度は弱まる傾向がある. 前者の傾向が表れる理由は, 重機の積載物による電波遮蔽の影響が小さくなるため, 後者の傾向が



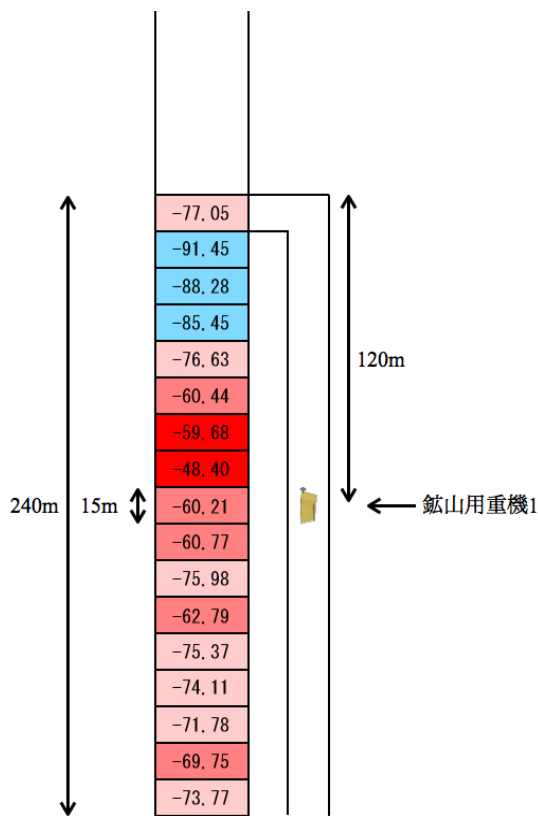


図 17 通信可否領域推定結果 (T 字路)

Fig. 17 RSS estimation by our function (T junction).

表れる理由は、カーブが緩やかになったことによって、アンテナ間の距離が大きくなり、かつ見通しが悪くなり、崖による電波遮蔽の影響が大きくなったためと考えられる。

図 12～図 16 の結果より、鉱山用重機の向き、アンテナの設置位置や曲率の違いによって、通信時の電波強度は変化するが、いずれの環境においても、鉱山用重機 2 が鉱山用重機 1 に接近する方向にある場合、図 14(a) の 3 段目右側後方に 120m 離れた領域と図 16(a) の 0 段目後方に 45m 離れた領域を除いて、通信が可能であるという結果が得られた。また、鉱山用重機 2 が鉱山用重機 1 から遠ざかる方向にある場合、通信不可能な領域が生じる傾向が分かった。

また、図 11 に示される仮想鉱山を対象とし、鉱山用重機 1 を T 字路の交差点の位置から 120m 離れた低段のスロープ上に配置し、鉱山用重機 2 を高段のスロープ上で、交差点の位置から 15m の間隔を空けて 240m 離れた位置まで移動させ、同様に、シミュレーションによって RSSI を算出し、通信可否領域を推定した。異なる段どうしの道路の接続部分となる T 字路周辺における推定結果を図 17 に示す。なお、鉱山用重機 1, 2 の進行方向はどちらも上方向である。鉱山用重機 1 の後方には、通信不可能な領域は存在しないため、後方から接近する車両の検知が可能であるが、一方、T 字路付近に通信不可能な領域が存在することが分かる。これは、その領域に存在する車両の検知は

不可能であること意味し、鉱山用重機 1 が T 字路を左折する方向に進行する場合、衝突事故の恐れがあることを示唆している。

以上の結果から、いずれの環境においても、自転車から遠ざかる車両の検知は困難であるが、自転車に接近する車両の検知は可能であり、Wi-Fi を用いた車車間通信により、周辺の重機の存在を把握することが期待できる。また、図 12～図 17 に示したように、提案した重機アンテナモデルにより、様々な鉱山環境下における重機間の通信状況を把握できることを示した。今後、実際の環境下で通信を行った際の通信可否ログを用いて、より正確な通信可否領域を推定する方法を検討する。実環境下における通信可否ログは、通信不可能な領域を運転手に知らせるための情報として非常に価値があるが、このような情報を活用できる場所は、過去に通信が発生し、通信可否ログが蓄積した場所のみで有効である。システム導入の初期段階は通信可否ログは少なく、また、鉱山の環境は時々刻々と変化し、過去の通信可否ログが使えなくなり、通信可否ログが十分ない状況においても、重機アンテナモデルを活用したシミュレーションにより、効果的に通信可否領域を推定できると考えている。

## 6. 結論

本研究では、鉱山用重機周辺の電波伝搬モデルを構築し、実測値との比較を行った。また、構築した電波伝搬モデルを用い、実際の鉱山の環境を参考にした仮想鉱山の 3D 地形モデル内での鉱山用重機間の通信時の電波強度をシミュレーションによって算出し、通信可否領域の推定を行った。その結果、3 段上の道路に存在する重機間との通信では、自転車へ接近する方向に走行している鉱山用重機との通信は可能である一方、自転車から遠ざかる方向に走行している鉱山用重機と通信を行う場合、重機間の距離が 120m 以内の範囲においても通信不可能な領域が存在することを示した。

提案手法で得られる結果は、露天掘り鉱山内の通信不可能な領域を可視化するとともに、得られた結果を基に、通信不可能な領域に他の重機が侵入する可能性があることを検知でき、衝突事故防止に貢献するものと考えている。今後、双方の重機が移動する環境を考慮したシミュレーション実験を行うとともに、そのシミュレーション結果を活かした鉱山用重機の安全運転支援システムを構築する予定である。また、より正確に現実の鉱山を再現しシミュレーションを行うとともに、様々な種類の仮想鉱山を用意し、通信可否領域を推定することによって、多種多様な鉱山に適用可能なデータを得ることを検討している。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 26220001 の助成を受けたものです。また、本研究を進めるにあたって、的確な助言をいただきました、Space-Time Engineering 社の高井峰生先生に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Agamennoni, G., Nieto, J. and Nebot, E.: Mining GPS data for extracting significant places, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.855–862, IEEE (2009).
- [2] Akki, A.S. and Haber, F.: A statistical model of mobile-to-mobile land communication channel, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.35, No.1, pp.2–7 (1986).
- [3] Bitrieve: Bitrieve Inc. products information, available from [http://www.bitrieve.co.jp/products/lan\\_analyzer/131](http://www.bitrieve.co.jp/products/lan_analyzer/131).
- [4] Blender Foundation: Blender Website, available from <https://www.blender.org>.
- [5] Boban, M., Barros, J. and Tonguz, O.: Geometry-based vehicle-to-vehicle channel modeling for large-scale simulation, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.63, No.9, pp.4146–4164 (2014).
- [6] Enji, S., Nieto, A. and Zhongxue, L.: GPS and Google Earth based 3D assisted driving system for trucks in surface mines, *Mining Science and Technology (China)*, Vol.20, No.1, pp.138–142 (2010).
- [7] Hustrulid, W.A., Kuchta, M. and Martin, R.K.: *Open Pit Mine Planning and Design, Two Volume Set & CD-ROM Pack*, CRC Press (2013).
- [8] Inspectorate, M.: Vehicle collisions – how long before it’s really bad?, Technical Report, Queensland Government Department of Natural Resources and Mines (2009).
- [9] Jacquet, P., Mühlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A. and Viennot, L.: Optimized link state routing protocol for ad hoc networks, *Proc. IEEE International Multi Topic Conference on Technology for the 21st Century.*, pp.62–68, IEEE (2001).
- [10] Laurence, D.: Safety rules and regulations on mine sites—the problem and a solution, *Journal of Safety Research*, Vol.36, No.1, pp.39–50 (2005).
- [11] MSHA: Safety standards for surface haulage; Proposed Rule (1998), available from <http://arlweb.msha.gov/REGS/FEDREG/PROPOSED/1998PROP/98-20351.htm>.
- [12] Nebot, E., Guivant, J. and Worrall, S.: Haul truck alignment monitoring and operator warning system, *Journal of Field Robotics*, Vol.23, No.2, pp.141–161 (2006).
- [13] Ni, W., Collings, I.B., Liu, R.P. and Chen, Z.: Relay-assisted wireless communication systems in mining vehicle safety applications, *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol.10, No.1, pp.615–627 (2014).
- [14] Parker, G.: Haul truck and light vehicle collision, Technical Report, NSW Government Department of Industry Resources & Energy (2015).
- [15] Randolph, R.F. and Boldt, C.M.: Safety analysis of surface haulage accidents, Technical Report, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Blacksburg, VA (United States). Dept. of Mining and Minerals Engineering (1996).
- [16] Ruff, T.M.: Test results of collision warning systems for surface mining dump trucks, Technical Report, National Institute for Occupational Safety and Health (2000).
- [17] Schiffbauer, W.H.: Active proximity warning system for surface and underground mining applications, *Mining engineering*, Vol.54, No.12, pp.40–48 (2002).
- [18] Sen, I. and Matolak, D.W.: Vehicle-vehicle channel models for the 5-GHz band, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.9, No.2, pp.235–245 (2008).
- [19] Space-Time Engineering: Space-Time Engineering Website, available from <https://www.spacetime-eng.com/jp/>.
- [20] Sun, E., Nieto, A. and Li, Z.: Real-time Google Earth 3D assisted driving system in surface mining operations, *Proc. IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design.*, pp.2095–2099, IEEE (2009).
- [21] Sun, E. and Zhang, X.: 3D Assisted driving system for haul trucks in surface mining, *Proc. 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering*, pp.363–366, IEEE (2011).
- [22] Sun, E., Zhang, X. and Li, Z.: Internet of things based 3D assisted driving system for trucks in mines, *Proc. 2011 International Conference on Innovation Management and Industrial Engineering*, Vol.1, pp.510–513, IEEE (2011).
- [23] Wang, C., Cheng, X. and Laurenson, D.I.: Vehicle-to-vehicle channel modeling and measurements: Recent advances and future challenges, *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, No.11, pp.96–103 (2009).
- [24] Worrall, S. and Nebot, E.M.: *A Comprehensive Approach to Improving Vehicle Safety in Mining*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (2007).
- [25] Wu, H., Liu, L. and Yuan, X.: Remote Monitoring System of Mine Vehicle Based on Wireless Sensor Network, *Proc. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Vol.2, pp.1015–1019, IEEE (2010).
- [26] 大水祐一 (編): 802.11 セキュア無線 LAN 設計ガイドブック, 電気通信協会 (2014).



長船 辰昭

1996年東京大学工学部物理工学科卒業。1998年同大学大学院物理工学専攻修了。現在、日立製作所研究開発グループ所属。ITS、テレマティクス等の研究に従事。IEEE 会員。



西村 友佑 (学生会員)

2016年大阪大学基礎工学部情報科学研究科卒業。同年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程進学。ITSに関する研究に興味。



加藤 聖也

2005年東京大学理学部地球惑星物理学専攻卒業。2007年同大学大学院地球惑星科学専攻修了。現在、日立製作所研究開発グループ所属。ITS、テレマティクス等の研究に従事。



廣森 聡仁 (正会員)

2004年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。2005年株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ入社。2008年大阪大学大学院情報科学研究科助教。2014年大阪大学大学院情報科学研究科講師。2016年より大阪大学大学院情報科学研究科准教授。博士(工学)。モバイルアプリケーションやモバイルネットワークの設計および性能評価に関する研究に従事。IEEE 会員。



山口 弘純 (正会員)

1994年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1998年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年オタワ大学客員研究員。1999年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。2002年同大学院情報科学研究科助手。2007年より同大学院情報科学研究科准教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング等に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



東野 輝夫 (正会員)

1979年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1984年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在, 同大学大学院情報科学研究科教授。博士(工学)。分散システム, 通信プロトコル, モバイルコンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員, IEEE Senior Member, 本会フェロー。