

20. 太陽光発電による自律式ネットルーティングの開発

大成建設株式会社
大成建設株式会社
大成建設株式会社

○ 新見 孝之
近藤 高弘
志波 由紀夫

1. はじめに

近年、情報化施工の普及に伴い、広大な施工現場の各所から取得したデータを事務所にて一括管理するシステムが実用化され始めている。

たとえば、無線センサネットワークを用いた土砂災害監視システム¹⁾では、複数のセンサで計測したデータを無線により、管理事務所へ転送している。しかし、センサへの電源確保や無線通信間の障害物の影響が課題としてあげられている。また、無線センサネットワークの斜面防災への適用に関する実験的研究²⁾において、センサや計測器はリチウム電池で駆動しているため、3 ヶ月に 1 度の電池交換が必要となる。

広域から取得したデータを中継するためには、中継装置を現場内に点在させる必要がある。しかし、中継装置には通信ケーブルや電源ケーブルが必要なため、設置場所はケーブルが届く範囲や作業しやすい場所に制限されたり、ケーブルの設置・盛り替え作業が発生したりして作業や費用が増大する。また、ケーブルレスを目的として、電源供給をバッテリーで行うと定期的なバッテリー交換などの作業が必要になる。

そこで、中継装置への電源供給に太陽光発電を用いることにより、ケーブルレスかつメンテナンスフリーな中継システムを構築した。また、無線ネットワークは、情報通信を無線で行うため、通信環境が不安定になりやすいという問題点がある。無線ネットワークの一部が通信不能になっても、自律的にルーティングを行うことができれば、信頼性の高い通信システムを構築することができる。そこで、自律的に無線ネットワークをルーティングするシステムを開発した。

2. 中継装置に適した太陽光パネルの選定

中継装置への電源供給には太陽光発電を用いた。昼間は太陽光発電による中継装置への電源供給およびバッテリーへの充電を行い、夜間はバッテリーからの電源供給で中継装置の機能を維持している。そこで、中継装置の機能維持に適した発電容量の太陽光パネルを選定した。

2.1 太陽光パネルの発電電力量比率

太陽光パネルは、受光面に受ける日射量に応じて発電量が変化するため、太陽光パネル面に対して、できる限り直角に太陽光が当たるように設置することが理想である。太陽光パネルを設置する方向は、北半球では南向きとする。太陽高度は、通年で変化し、夏季は高角度、冬季は低角度になる。季節に合わせて太陽光パネルの角度を変化させることが理想だが、年に何回も太陽光パネルの角度を変えるのは困難なため、通常は固定設置となる。

今回の実験では、発電電力量比率 r を

$$r = \frac{P_w}{P} \dots\dots\dots (1)$$

と定義する。ここで、 P は太陽光パネルの定格発電容量とし、 P_w は実際に発電したソーラ起電力とする。つまり、発電電力量比率 r とは太陽光パネルの発電効率を表している。

年間の最低発電量時（主に冬季間）の発電量が最大となるような角度で太陽光パネルを設置することが必要となる。冬至の南中高度は 32° のため、太陽光パネル面に対して、できる限り直角に太陽光が当たるように太陽光パネルを 58° に傾けて南向きに設置する。

太陽光パネルで発電できる日照時間中のソーラ起電力 P_w をモニタリングするため、6 時～16 時までの 1 時間毎の発電量を記録した。

ここで、ソーラ起電力 P_w を直接測定することは困難なため、太陽光パネルに抵抗負荷を設置し、その抵抗負荷にかかる電圧を測定することによりソーラ起電力 P_w を算出した。

ソーラ起電力 P_w は、

$$P_w = IE \dots\dots\dots (2)$$

で求めることができる。ここで、 I は電流値、 E は電圧値とする。電流値 I はオームの法則より、

$$I = \frac{E}{R} \dots\dots\dots(3)$$

で求めることができる。ここで、 R は抵抗値とする。式(2)および式(3)より、ソーラ起電力 P_w は、

$$P_w = \frac{E^2}{R} \dots\dots\dots(4)$$

となり、電圧値 E および抵抗値 R からソーラ起電力 P_w を算出することができる。

また、今回の実験では、1 V、0.4 w の単結晶太陽電池モジュールを使用しているため、式(4)より抵抗負荷を 2.5Ω に設定した。

実験装置を図-1 に示す。太陽光パネル面に対して、できる限り直角に太陽光が当たるように、太陽電池モジュールの傾きを変化させた。

実験結果を図-2 に示す。実験では、6 時～16 時までの 1 時間毎の電圧値 E を測定し、式(1)および式(4)より、発電電力量比率 r を算出した。図-2 より、時間によって発電電力量比率 r が変化し、正午頃に最大となることがわかる。したがって、太陽光パネルの選定には、

$$P_c < r \times P \dots\dots\dots(5)$$

を満たす必要がある。ここで、 P_c は機器の消費電力とする。

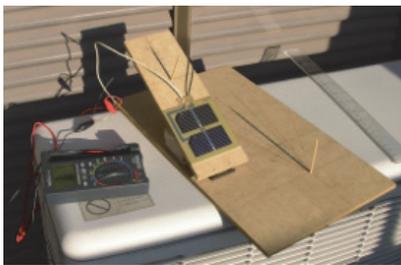


図-1 実験装置

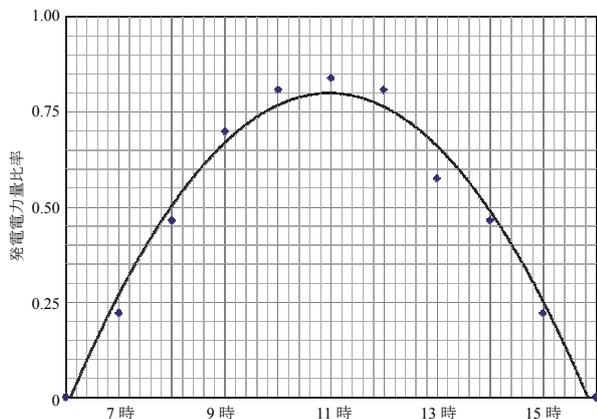


図-2 冬至における発電電力量比率の日変化

2.2 中継装置の構成

今回開発した中継装置は、無線 LAN ユニット、太陽光パネル、バッテリー、電力モニタユニットから構成されている。中継装置の構成を図-3 に示す。

今回の通信モジュールには、特定小電力無線に比べて安価で高速かつ大容量での情報通信ができる無線 LAN を使用した。

また、アドホック機能を付加するために 2 ch の WiFi モジュールを有した中継装置を開発した。今回は特定の中継装置にデータを集約させる機能を追加した。

さらに、中継装置に最適な太陽光パネルの定格発電容量を選定するため、電力モニタユニットを設置し、中継装置が通信を行っている際の消費電力等をモニタリングした。

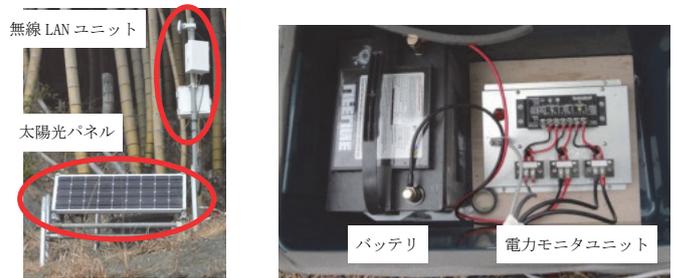


図-3 中継装置の構成

2.3 消費電力モニタリング

開発した中継装置の中継機能を検証するため、第二東名高速道路設楽原パーキングエリア工事現場において、2013 年 2 月から 7 月の約 5 か月間にわたり実証試験を行った。

現場に設置している太陽光パネルの発電容量は、以下の 3 点を設計条件として算出し、決定した。

- ① 1 時間で 1 日分の消費電力量を発電できる
- ② 中継装置の消費電力量を 2.5 w と仮定する
- ③ 発電電力量比率 r を 0.75 と仮定する

ここで、設計条件①は悪天候で太陽光発電が十分にできない場合を考慮している。また、中継装置の消費電力量は通信容量によって変化するため、設計条件②のように仮定した。

以上の条件より、太陽光パネルの発電容量を計算すると

$$2.5w \times 24hr \div 0.75 = 80wh \dots\dots\dots(6)$$

となることから、80 wh の太陽光パネルを現場の中継装置に設置した。

現場実証試験では、GPS の測位データを中継した際の消費電力をモニタリングすることにより、式(5)を満たす最適な太陽光パネルの選定を試みることにした。

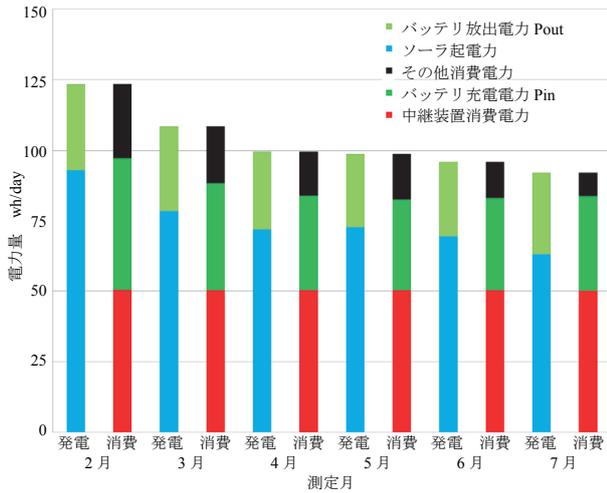


図-4 電力モニタリング結果

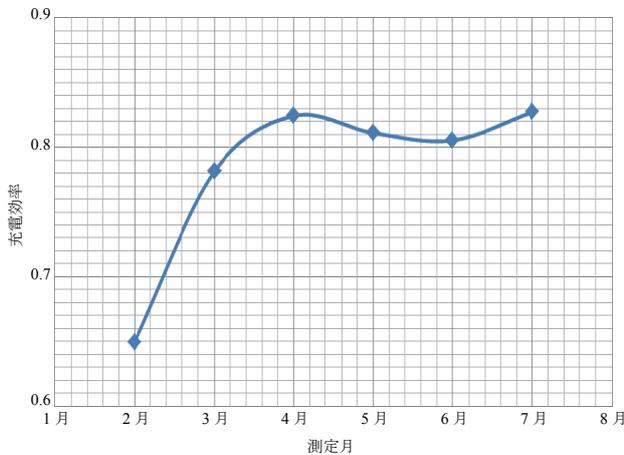


図-5 充電効率の月変化

ソーラ起電力およびバッテリー放出電力、中継装置消費電力、バッテリー充電電力をモニタリングした結果を図-4 に示す。図-4 より季節が冬から夏にかけて太陽光パネルからバッテリーに供給される電力 P_{in} が小さくなっていることがわかる。これは、夏の単位時間当たりのソーラ起電力 P_w が冬に比べて大きくなることにより、発電電力量比率 r が大きくなり、バッテリーへの充電が効率的に行われていることを示している。

ここで、充電効率 E を

$$E = \frac{P_{out}}{P_{in}} \dots\dots\dots(7)$$

と定義する。 P_{in} は太陽光パネルからバッテリーに供給される電力とし、 P_{out} は消費されたバッテリー電力とする。

充電効率 E の月変化を図-5 に示す。図-5 より、充電効率は季節が冬から夏になるにつれて大きくなっていることがわかる。これは、図-4 に示すよ

うに消費されたバッテリー電力 P_{out} がほぼ一定であるのに対し、太陽光パネルからバッテリーに供給される電力 P_{in} が小さくなるためである。

また、2月と7月の日照時間中のソーラ起電力とバッテリー充電電力を図-6 および図-7 に示す。図-6 の2月では約10時間かけて充電されているのに対し、図-7 の7月では約5.5時間で充電が完了していることがわかる。つまり、冬より夏のほうが充電時間が短くなっているということである。

これは、先述したとおり、夏の単位時間当たりのソーラ起電力 P_w が冬に比べて大きくなることにより、発電電力量比率 r が大きくなり、バッテリーへの充電が効率的に行われていることに起因していると考えられる。

図-4 より、中継装置の消費電力は50 w/dayつまり2.03 whで季節によらずほぼ一定となっていることがわかる。そこで、中継装置の消費電力を基に最適な太陽光パネルを選定する。

図-2 の発電電力量比率 r から、発電容量 P が80 wh, 40 wh, 20 wh, 10 whの太陽光パネルのソーラ起電力 P_w の日変化を推定した。

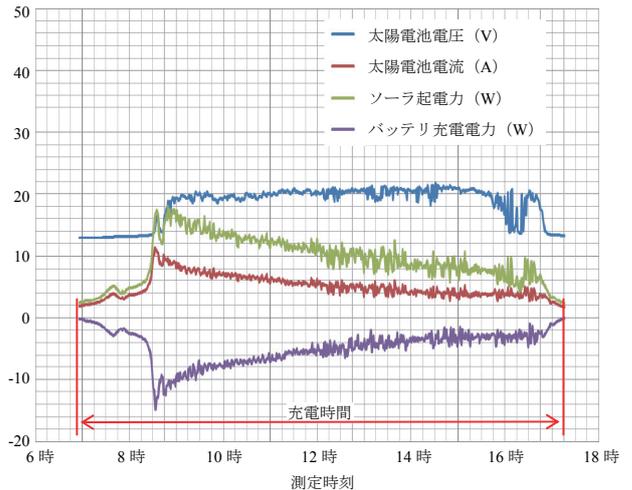


図-6 2月のモニタリング結果

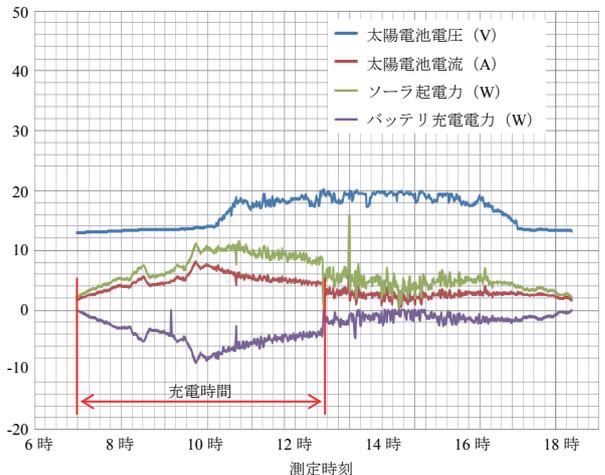


図-7 7月のモニタリング結果

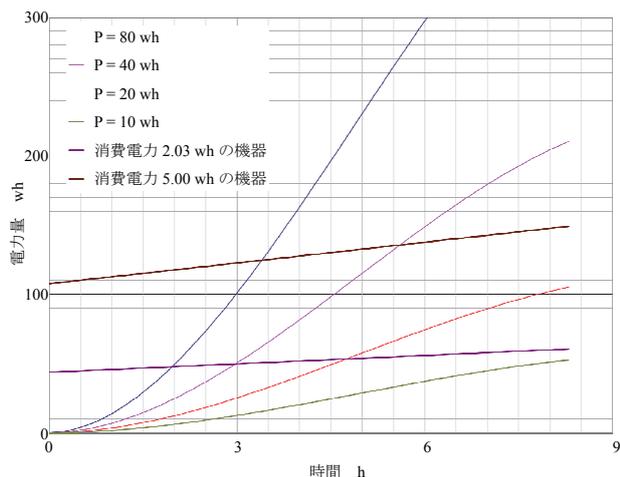


図-8 ソーラ起電力と充電時間

推定した結果を図-8 に示す。また、図-8 には中継装置の消費電力 2.03 wh および一般的な無線機器の消費電力 5.00 wh を重ねた。

定格発電容量が 10 wh の場合、中継装置の消費・充電曲線が 10 wh の曲線と交わる点が充電時間となり、日照時間のほとんどの時間で充電が必要となることがわかる。一方、20 wh のときは充電時間が 4.5 時間、40 wh のときは 3.0 時間となる。したがって、今回の中継装置には定格発電容量が 20 wh もしくは 40 wh の太陽光パネルが最適であるといえる。

また、一般的な無線機器に対しては、40 wh のときは充電時間が 5.5 時間、80 wh のときは 3.5 時間となる。

以上より、太陽光パネルの選定にあたっては、中継装置の消費電力の約 10~20 倍の発電容量とすることが最適であると考えられる。

3. 自律ルーティングシステム

3.1 各種機能の定義

自律ルーティングシステムでネットワークを構築するにあたり、中継装置が自律的に他の中継装置と接続するための役割と名称を定義した。

3.1.1 マスターとスレーブ

中継装置には 0~127 までの ID が割り当てられており、ID 0 の中継装置をマスター、その他をスレーブと呼ぶこととする。マスターは、すべての中継器の上位に来るため、マスターが管理用の PC と接続されることでネットワーク上のデータを取得することができる。

3.1.2 クリエイターとジョイナー

中継装置には 2ch の Wi-Fi モジュールがあり、クリエイター(ch1)とジョイナー(ch2)の 2 つのモードに設定されている。

クリエイターは、ジョイナーからのサーチ・接

続要求を受けるのみで、最大 8 つのジョイナーと同時に接続できる。一方、ジョイナーは、クリエイターへのサーチ・接続要求ができる。しかし、複数のクリエイターと同時に接続を行うことはできない。

マスターは ch1・ch2 ともにクリエイターとして固定し、スレーブからの接続を待つのみである。スレーブの ch1 はクリエイターに設定し、ch2 はジョイナーに設定する。

マスターとスレーブのクリエイターおよびジョイナーのイメージを図-9 に示す。

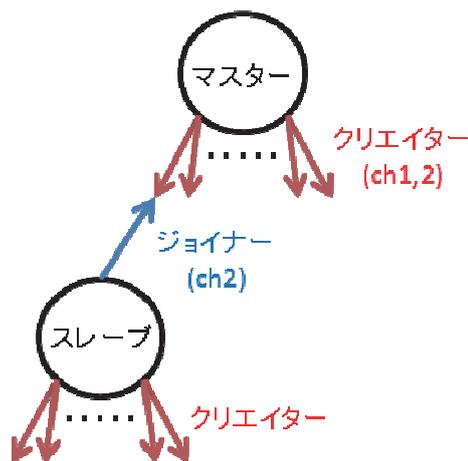


図-9 クリエイターとジョイナーのイメージ

3.1.3 ホップ数

各中継装置の上位・下位の関係を明らかにするため、ホップ数という概念を定義する。

マスターの中継装置はホップ数を 0 とする。マスターに接続している中継装置はホップ数を 1 とする。ホップ数 1 の中継装置に接続している中継装置はホップ数を 2 とする。以下、ホップ数 n の中継装置に接続している中継装置はホップ数を $n+1$ として定義していく。

どの中継装置にも接続していない中継装置のホップ数は -1 とする。また、ホップ数 -1 の中継装置に接続している中継装置のホップ数も -1 とする。ホップ数のイメージを図-10 に示す。

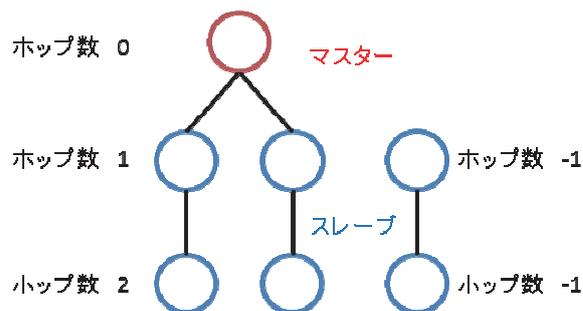


図-10 ホップ数のイメージ

3.1.4 RSSI（電波受信強度）テーブル

RSSIとは、中継装置が別の中継装置からの信号を受信した際の電波強度を表す指標である。表-1に示すようなRSSIテーブルにRSSIが記入されている中継装置とは通信することができる。たとえば、ID=2はID=0, 5, 6, 7とは通信（接続）することができるが、ID=3, 4, 8, 9とは通信（接続）することができない。

各中継装置はRSSIテーブルに従い、他の中継装置と接続できるかどうか判断する。接続先をサーチできるのはジョイナーのみのため、各ジョイナーはRSSIを取得したクリエイターと接続しようとする。ここで、同じジョイナーが複数のクリエイターからRSSIを取得した場合は、RSSIが最も高いクリエイターと接続する。

たとえば、ID=7のジョイナーがID=2のクリエイターに接続するように、RSSIテーブルを用いることにより、ジョイナーは接続可能なクリエイターを見つけることができる。

表-1 RSSI テーブル

		ジョイナー-ID								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
クリエイター-ID	0 (ch1)	100								
	0 (ch2)	50	86							
	1			41	22			31	59	
	2					67		43	25	
	3	61								
	4	72		58						74
	5		18				26			
	6		9							
	7		32							
	8	59						17		
9	3			88		9				

3.2 システム立ち上げ時の自律ルーティング

中継装置を現場に導入して中継システムを立ち上げる際、各中継装置はホップ数およびRSSIから自律的に最適なルーティングを行う。

システム立ち上げ時の自律ルーティングの手順を以下に示す。

手順(1) マスター (ID = 0) の中継装置はホップ数を0に設定する。マスター (ID = 0) 以外の中継装置は自らのホップ数を-1に設定する。

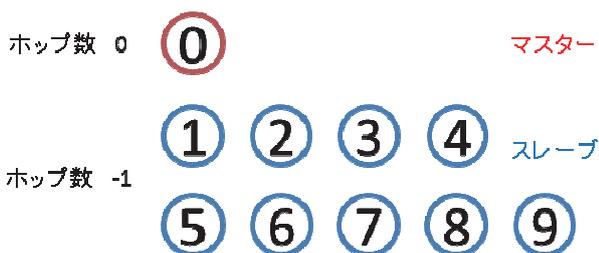


図-11 ホップ数の設定

手順(2) ジョイナーを使用してマスターもしくは他のスレーブのクリエイターをサーチし、それぞれのRSSIを記憶することにより、RSSIテーブルを作成する。

手順(3) ホップ数0以上の中継装置の中でRSSIが最も大きい中継装置に接続する。接続先をサーチできるのはジョイナーのみのため、表-1のRSSIテーブルより、ID=1およびID=2の中継装置がマスター (ID=0) と接続できることがわかる。ここで、ID=1はID=0(ch1)のRSSI > ID=0(ch2)のRSSIとなるため、ID=0(ch1)と接続する。したがって、図-12のようなルートが設定される。

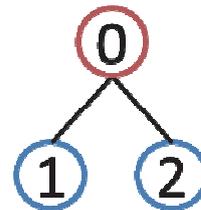


図-12 マスターとの接続

手順(4) 自身のホップ数を「接続した中継装置のホップ数+1」に再設定する。

手順(5) ホップ数0以上の中継装置に接続できなかった中継装置は手順(3)に戻り、接続できる中継装置を探索する。

図-12および表-1より、ID=3およびID=4の中継装置はID=1の中継装置に接続する。

ID=3の中継装置にとってID=4の中継装置はID=1の中継装置よりRSSIが高いが、ホップ数が-1のため、接続しない。

また、ID=5の中継装置は、ID=2の中継装置に接続する。ID=7の中継装置は、ID=1およびID=2の中継装置と接続できるが、RSSIが高いID=2の中継装置と接続する。同様に、ID=8の中継装置はID=1の中継装置と接続する。

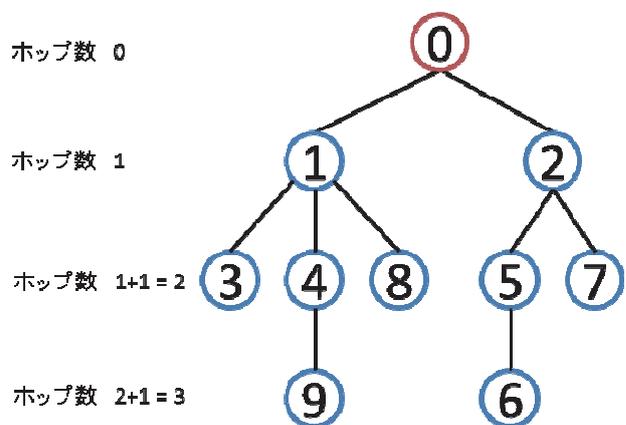


図-13 自律的に構成されたネットワーク

最後に、ID = 6 の中継装置は ID = 5 の中継装置に接続し、ID = 9 の中継装置は ID = 4 の中継装置に接続する。以上より、図-13 のようなネットワークが構成される。

3.3 通信障害発生時の自律ルーティング

3.2 で構成されたネットワークの一部に通信障害等が発生した際、自律的に最適なルートを再探索する手順を以下に示す。例として、図-13 のネットワークで ID = 5 と ID = 6 の接続が切れた場合を考える。

表-1 の RSSI テーブルより、ID = 6 の中継装置は ID = 8 および ID = 9 と接続可能なことがわかる。

ここで、ID = 6 の中継装置は RSSI が高い ID = 8 の中継装置に接続する。このようにネットワークの一部の接続が切れた際は、RSSI テーブルを基に最適なルートを再探索することができる。自律ルーティングにより、再構築したネットワークを図-15 に示す。

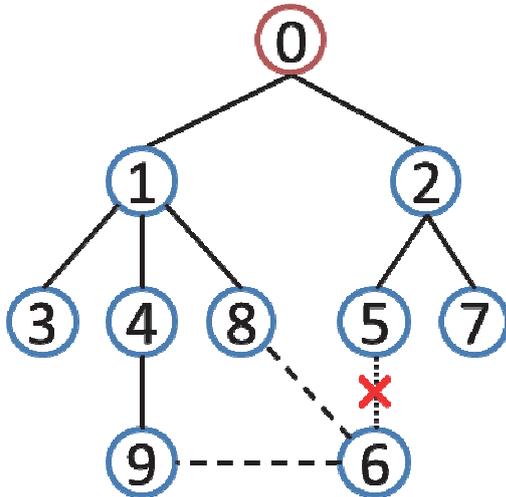


図-14 通信障害が発生したネットワーク

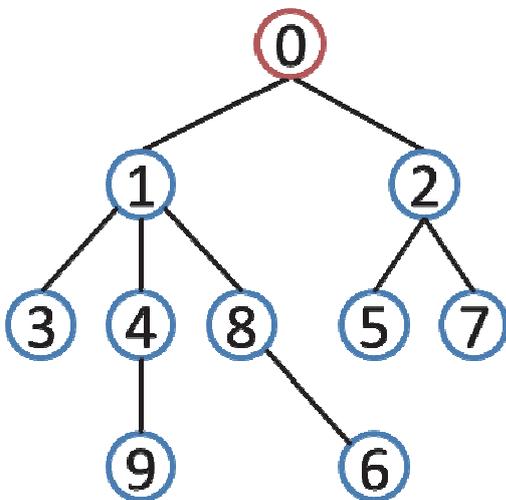


図-15 再構築したネットワーク

4. まとめ

中継装置への電源供給に太陽光発電を用いることにより、ケーブルレスかつメンテナンスフリーな中継システムを構築した。また、現場に設置した中継装置の消費電力をモニタリングすることにより、通信状態の中継装置を駆動させるのに適した発電容量の太陽光パネルを提案した。

中継装置間の最適なルーティングや通信障害発生時のルート再探索ができる自律ルーティングを開発した。今後は、開発した中継装置を使用した自律ルーティング試験を行い、自律ルーティングの理論を実証する予定である。

謝辞

本開発にあたり、開発内容を御理解いただき現場実証試験にご協力いただきました、中日本高速道路株式会社豊川工事事務所の関係者の方々ならびに第二東名高速道路設楽原パーキングエリア工事現場の関係者の方々には、この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 上出定幸, 小泉圭吾, 尾上一馬, 藤田行茂: 無線センサネットワークによる土砂災害監視システムの開発, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号9, pp.45-50, 2009.
- 2) 平井一弘, 里見知昭, 酒匂一成, 深川良一: 無線センサネットワークの斜面防災への適用に関する実験的研究, 歴史都市防災論文集 Vol.3, pp.99-104, 2009.