

東京大学
情報理工学系研究科 電子情報学専攻
修士論文

電力線通信による太陽光パネル間切断手法の研究
Disconnecting System of each PV Panel using PLC

岸本 丈
Takeru Kishimoto

指導教員 落合秀也 准教授
江崎 浩 教授

2018年2月

概要

近年太陽光発電システムは、技術進歩に伴って石油に代わる代替エネルギーとして注目されている。しかし太陽光パネル発電にはいくつか問題点があり、それらを解消するために太陽光パネル単位でのモニタリング機能とストリングからの切り離し機能の重要性が高まっている。前者は問題のあるパネルを早期発見するために必要であり、後者は太陽光の存在する環境下では常に発電し続けてしまう太陽光パネルストリングの出力電圧を抑え火災などの緊急時に安全性を確保するために必要となる。従来から太陽光パネルのモニタリングに関しては様々な手法を用いた研究がなされているが、中でも電力線通信を用いたものは、余計な配線が必要なく広範囲に適用できることから有用であると考えられる。しかし電力線通信を用いた通信においてインバータや MPPT によるノイズ、天候条件によってどのような影響を受けるかが想定されていないことが多い。また太陽光パネルの出力電圧を抑えるために太陽光パネルを短絡して出力電圧を疑似的に 0V にすることで、ストリングからは切断されたようにする回路が研究されている。そこで本研究では通信手段として PPLC-PV の技術を用いた電力線通信を用い、現在機能として搭載されていないパネル単位での切断機能を導入したモニタリングと緊急時の回路切断システムを提案し、それに対し外乱があった場合にどのような影響を受けるかを実験し評価を行った。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本論文の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	太陽光パネルの問題点	3
2.1	メンテナンスの必要性	3
2.1.1	Hotspot	4
2.1.2	経年劣化	5
2.2	火災等の緊急時の安全性	5
2.2.1	実際の事件	6
2.2.2	National Electrical Code(NEC) 2017	7
第 3 章	関連技術	9
3.1	太陽光パネルとの通信	9
3.1.1	通信線の利用	9
3.1.2	無線通信の利用	10
3.1.3	電力線の利用	10
3.1.4	ドローンの利用	12
3.1.5	まとめ	12
3.2	太陽光パネルの切断	12
3.2.1	パネル単位での切断回路	13
3.2.2	Solar Edge Power Optimizer	14
3.2.3	本研究の位置付け	14
第 4 章	提案手法	15
4.1	要件	15
4.2	システム概要	15
4.3	実装する回路図	17

第 5 章	実装	18
5.1	ハードウェアの実装	18
5.1.1	シミュレーション	18
5.2	ソフトウェアの実装	21
5.2.1	パケット構造	21
5.2.2	パルスの作成方法	23
5.2.3	パルスの読み取り方	24
5.2.4	割り込み用の Timer 関数	26
5.3	GUI インターフェース	27
第 6 章	実験	28
6.1	室内実験	28
6.1.1	実験の様子	28
6.1.2	通信機能の確認	29
6.1.3	切断・復帰機能の確認	30
6.2	屋外実験	31
6.2.1	実験の様子	31
6.2.2	通信機能の確認	31
6.2.3	切断・復帰機能の確認	32
6.3	機能評価	33
6.4	考察	33
第 7 章	結論	35
7.1	まとめ	35
7.2	今後の課題	35
	発表文献と研究活動	37
	参考文献	38
	付録	43
A	モジュールの詳細な回路図	43

目次

2.1	太陽光発電所の外観	3
2.2	太陽光パネルの簡略図	4
2.3	hotspot 対策のダイオード	4
2.4	感電時の通過電流とその経過時間による人体反応の区分 [1]	6
2.5	ASKUL 社の火災	7
2.6	NEC2014[2]	8
2.7	NEC2017[2]	8
3.1	通信線を利用した太陽光パネルモニタリングシステム [3]	9
3.2	無線通信を利用した太陽光パネルモニタリングシステム [3]	10
3.3	電圧による PLC を利用した回路図の受信部 [3]	11
3.4	PPLC-PV 回路図 [4]	11
3.5	太陽光パネルの切断機構 [5]	13
4.1	提案システムのモニタリング	16
4.2	Slave モジュールが切断される例: heartbeat を一定時間受け取れない場合	16
4.3	Slave モジュールが切断される例: 切断命令を受信した場合	16
4.4	回路図	17
5.1	SY-M12W-12 の IV カーブ	19
5.2	太陽光パネルのシミュレーション上での回路図	19
5.3	シミュレーション上での回路図	20
5.4	1.6 秒ごとにスイッチを OFF にした場合の LTspice の出力結果	21
5.5	作成したモジュール	22
5.6	パケット構造	22
5.7	信号の概要	23
5.8	オシロスコープにより観測されたモジュールによるパルス	24
5.9	モジュールの個数によるパルスの高さの変化	25
5.10	モジュールの個数によるパルスの高さの変化	26
5.11	Web インタフェース	27

vi 目次

6.1	室内実験の様子	28
6.2	raspberry pi に保存された 10 秒間のパケットの様子	29
6.3	切断回路によって電圧が順次落ち、その後復帰する様子	30
6.4	屋外実験の様子	31
6.5	観測されたパケットの時間ごとの読み取り率	32
6.6	マルチメータによるストリング電圧が降下する様子	32
6.7	曇り時に連続して観測されたパルス	33
6.8	曇り時に一定間隔で観測されたパルス	33
6.9	復帰直後のパルスの乱れ	34
6.10	ID3 の返信パケット	34

表目次

3.1	太陽光パネル間の通信技術の比較	12
5.1	モジュール作成に使用した素子	18
5.2	データシート値とシミュレーションとの比較	20
6.1	パケットの測定結果	29

第 1 章

序論

1.1 背景

太陽光パネルによる発電は石油に代わるクリーンなエネルギーとして、日本をはじめ多くの国で研究が行われている。その結果太陽光パネルはその性能が飛躍的進歩を遂げ、それに伴う価格の低下などから広く普及している。Arnulf によれば 2010 年に太陽光パネルの生産量は発電量換算で 20 GW であったのに対し、2017 年は 80 GW から 85 GW であると想定されている [6]。このような市場の拡大から、現在では家庭への導入をはじめ太陽光パネルを何万枚も用いた大規模な太陽光発電所が各地で建設されている。この太陽光パネルに関して、運用上いくつか問題となることが挙げられる。一つ目はメンテナンスの必要性である。太陽光パネルは長期メンテナンスフリーを掲げるものが多いが、実際は初期不良などがかなりの頻度で発生することが環境省のデータから読み取ることができる [7]。これらの故障は発電量の低下はもちろん、Hotspot 現象を引き起こす可能性があり危険であるため、早急に原因となるパネルを特定し修理交換を行う必要がある。ところが太陽光発電において、通常出力電圧を上昇させるために太陽光パネルを直列に何枚も接続したストリング構造を用いる。さらにこのストリングを並列に何枚もつないで太陽電池アレイを形成している。このように何枚も太陽光パネルが存在する中でストリング単位での監視システムは多く存在していたが、その場合パネル 1 枚の出力低下は小さなものなのでそもそも検知できなかつたり、ストリング上のパネル 1 枚 1 枚に対して専用のテスターを用いてその電圧値・電流値を読み取るという作業を繰り返し、異常を引き起こしている原因となったパネルを特定する必要があった。この問題を解決するために、各太陽光パネルにセンサや通信モジュールを取り付けてモニタリングする方法が長年研究されており、製品にもなっている。大規模な太陽光発電所でのモニタリングでは、センサーや通信方法、どのようにデータを集めるか、セキュリティといった数多くの課題が挙げられる [8]。二つ目は安全性である。太陽光パネルのストリング構造はその出力電圧が何百 V にも及ぶ。また前述の Hotspot 現象は、最悪の場合火災に発展する危険性がある。そして太陽光パネル発電設備を備えた施設において火災が発生した場合、太陽光パネルは太陽が照り続ける限り発電しまうため、消防士が消火活動を行う際に放水した水を電流が伝って感電してしまうという事故が数多く発生し、消防研究技術書として太陽光発電システム火災と消防活動における安全対

2 第1章 序論

策というマニュアルが消防庁から発行されている [9]。このように太陽光パネルの火災時における安全性の確保は急務であると考えられる。しかしストリング単位で太陽光パネルを切断するシステムは多く存在するが、より安全性の高い太陽光パネル単位での切断機能を搭載したものは少ない。

1.2 本論文の目的

よって本研究では太陽光発電を運営する上でメンテナンスの簡易化につながるモニタリングに必要な通信機能、火災が起こった際に安全に消火活動を行うことができるようにする切断機能の二つを組み合わせたシステムを構築することを目指す。そのために太陽光パネルに取り付ける通信機能と切断機能を持ったモジュールを開発する。またそれらについて室内環境で検証を行った後に実環境に近づけた試運転を行い、得られたデータについて評価・検討を行う。

1.3 本論文の構成

第1章では本研究の背景と目的について述べた。第2章では太陽光パネル発電に関する問題点について詳しく述べる。第3章では本研究に関連した技術・研究について述べる。第4章では本研究の提案するシステムの設計を述べる。第5章でそのシステムの実装部分について述べたのち、第6章でそれらの動作検証と議論を行う。そして、第7章において本研究のまとめを行う。

第 2 章

太陽光パネルの問題点

本章では太陽光パネルが持つ問題点について述べる。2.1 では主に太陽光パネル単位でのメンテナンスが必要である点、2.2 では緊急時に安全性が担保できない点について主に説明する。

2.1 メンテナンスの必要性

太陽光発電所は一般的には以下の図 2.1 のような構成になっている。

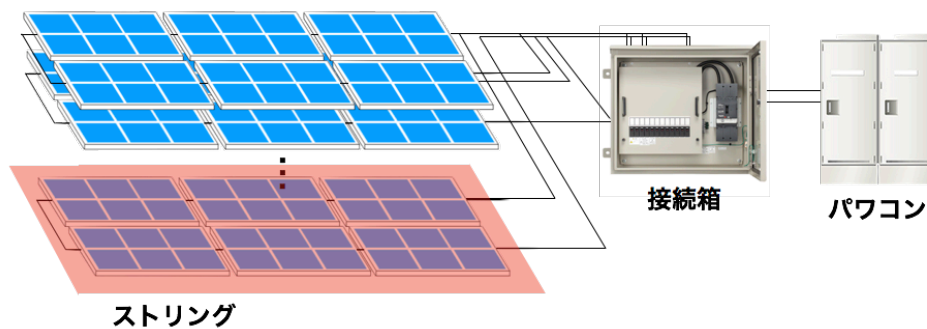


図 2.1: 太陽光発電所の外観

太陽光パネルが複数枚直列に接続されたものをストリングと呼び、これにより高電圧を発生させる。またこれらのストリングをいくつも用意することで電流も大きくさせ、それらを接続箱を通して集約し、最終的にはパワーコンディショナーによってそれらの電気を家庭で利用できるような形に変換する。このように太陽光パネルを用いた発電所では非常に多くの太陽光パネルを利用して発電を行う。この際ストリング内の一つのパネルが以下 2.1.1、2.1.2 で紹介するような不調をきたした場合、ストリング単位でのモニタリングではどのパネルにおいて実際に問題が起こっているか判断がつかない。しかしこのようなパネルはストリング全体の効率を大きく下げたり、最悪の場合重大な事故を引き起こす可能性がある。このような特性から太陽光パネル発電所では定期的に太陽光パネル単位でのメンテナンスを行い、故障パネルを早期発見・交換する必要があると言える。

2.1.1 Hotspot

太陽光パネルの不調の原因の一つとして Hotspot 現象が挙げられる。太陽光パネルは回路図で示せば以下の図 2.2 のような電流源とダイオードの組み合わせと考えることができる。

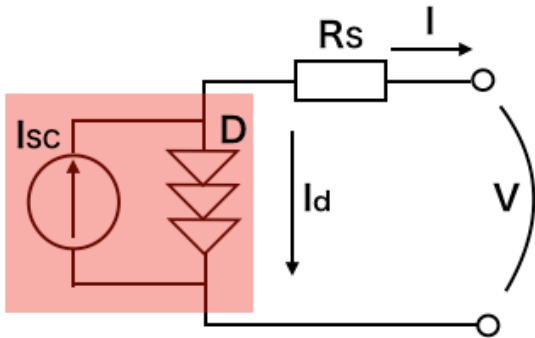


図 2.2: 太陽光パネルの簡略図

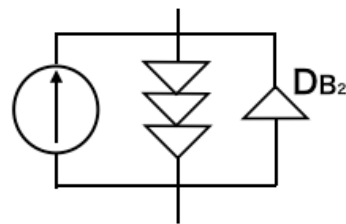


図 2.3: hotspot 対策のダイオード

この電流源が太陽の照度に対応して電流を発生させる。そして全体としての出力電流は以下のように表すことができる。

$$I_d = I_0 \exp(q(V - R_s I) / nkT) - 1 \quad (2.1)$$

$$I = I_{sc} - I_0 \exp(q(V - R_s I) / nkT) - 1 \quad (2.2)$$

ここで q は素電荷で 1.6×10^{-19} C、 n は理想因子、 k はボルツマン定数 1.38×10^{-23} J/K、 T は絶対温度を表している。ここでもし太陽光パネルに障害物がある等の不具合が発生し電流源での発電が止まった場合、電流の通り道がなくなり、結果としてダイオードに対して逆バイアスで高電圧が発生し高温が発生する。その結果、性能の悪化や故障、最悪の場合は火災の発生原因となる。これが Hotspot と呼ばれる現象である。MPPT により IV カーブを常にトラッキングすることでこの Hotspot 現象が起こっている太陽光パネルを特定する研究は存在するが [10]、一般的にはこれを防ぐため、太陽光パネルに事前にバイパスダイオードを追加で挟み込むことで対応する [11]。この様子を図 2.3 に示す。この図中 D_B で示されたバイパスダイオードにより上述の状態においても電流の迂回路を確保できるため、Hotspot 現象を回避することができる。しかし、これらのバイパスダイオードが長時間の使用の結果故障することが考えられる。それを防ぐために常にパネル単位での電圧値のモニタリングを行うことが肝心となる。

2.1.2 経年劣化

太陽光パネルは配線の腐食や断線、ガラス表面の汚れや変形、変色などによって年々性能が劣化していく。ゆえに各メーカーは太陽光パネルの保証期間を提示している。太陽光パネルの登場時にはその保証期間は5年程度のものであったが、現在では長年の研究により25年程度までこの保証期間は延長されてきている。そしてこの保証の内容は10年から12年の使用で効率が90%、20年から25年の使用で効率が80%程度までしか劣化しないことを一般的には指す。M. Vazquezらの調査によれば、様々な太陽光パネルと環境化での実験をした結果最小のもので年0.3%、最大で3.52%程度の経年劣化が確認された[12]。彼らはこれらの情報をもとに経年劣化のモデルを作成している。また hotspot の項目で述べたように、太陽光パネルストリング中の一部の特定のパネルだけが何らかの障害物によって発電できない状態にあった場合、バイパスダイオードが長時間使用されそのパネルのみが他のパネルより早く故障する可能性は増加する。

2.2 火災等の緊急時の安全性

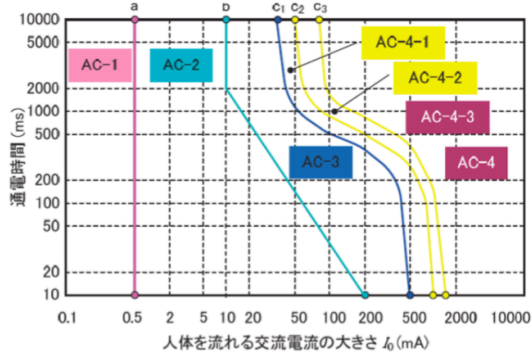
太陽光パネル発電所では前述の Hotspot 現象、接続するケーブルの型の違い、インバーター側での故障など様々な火災の原因が存在する。また直接的な火災の原因が太陽光パネルではないが、火災現場に太陽光パネルが存在するケースも考えられる。このような火災現場を想定した場合、太陽光パネルの性質が大きな問題となる。それは太陽光パネル発電所では基本的にパネルが直列にいくつも接続されていることから高電圧を発生させている点と、太陽がある限り太陽光パネルは発電を続けてしまう点である。International Electrotechnical Commission(IEC)の技術仕様書では感電時の通過電流とその経過時間による人体反応についてまとめられている[13]。図2.4はその区分を示したものである。

感電した場合には体が麻痺してとっさに手を離すことが難しい場合を考慮すれば、この表から10mA以上の電流でも危険であり、50mA以上の電流では死の危険性があることがわかる。人間の抵抗値は人体の内部抵抗と皮膚の接触抵抗の和となるが、内部抵抗はおよそ500Ωであるのに対し、接触抵抗は乾燥状態によって0Ωから4000Ω程度になるとされている[14]。太陽光パネルのストリングの出力は家庭用のものでも400V程度、大規模なものでは1000Vを超えることから考えれば、人体の抵抗値を大きく見積もったとしてもオームの法則から10mA以上の危険な電流が流れる可能性があることがわかる。さらにこの電気は直接電力線に触れるだけでなく、放水を伝ってくるおそれがあることから消防士は細心の注意を払う必要があった。また太陽光パネルが屋根の上に存在することから位置的にも消化が困難であることや、素材が燃焼することで発生する有毒ガスなど様々な原因も存在する。実際の被害の種類や消防活動時の技術情報をまとめた資料が産業技術総合研究所から提示されている[1]。

6 第2章 太陽光パネルの問題点

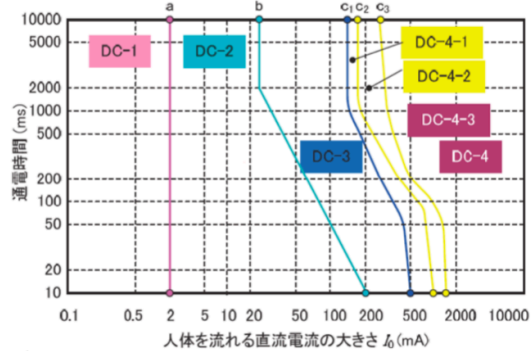
交流の場合

領域	生理学的影響
AC-1	通常無反応
AC-2	通常有害な生理学的影響なし。
AC-3	電流が二秒以上継続して流れると痙攣性の筋収縮や呼吸困難の可能性ある。
AC-4	心停止、呼吸停止または重度のやけどといった病理生理学上の危険な症状を引き起こされることがある。 AC-4-1: 心室細動確率約5%以下 AC-4-2: 約50%以下 AC-4-3: 約50%以上



直流の場合

領域	生理学的影響
DC-1	通常無反応、わずかに刺すような痛み
DC-2	通常有害な生理学的影響なし。
DC-3	心臓に回復可能な障害と伝達障害が起きる可能性がある。
DC-4	危険な病理生理学上の症状を引き起こされることがある。 DC-4-1: 心室細動確率約5%以下 DC-4-2: 約50%以下 DC-4-3: 約50%以上



ただし太陽光発電は、上表(IEC479-1)が定義する直流ではない。
※日中、日射急変するとき、また、夜間の灯火による発電は、交流性を帯びる。

図 2.4: 感電時の通過電流とその経過時間による人体反応の区分 [1]

2.2.1 実際の事件

近年にあった事故として 2017 年 2 月に発生した、図 2.5 のアスクルの倉庫で起こった火災が有名である [15]。この火災の直接的な原因は太陽光パネルではなくフォークリフトによる作業であるとみられているが、被害が拡大した原因としては倉庫の上に 3700 枚設置された太陽光パネルが挙げられている。このとき、即座にパワーコンディショナを遮断することには成功したが、それだけではパワーコンディショナまでの直流回路を遮断できておらず、接続箱と終電箱のスイッチを切り安全性を高めるまでには 1 日を要したとされている。その間消防士は水を棒状に噴射する「棒状注水」が禁止され水を霧状にしか噴射できなかったため、延焼が進み最大で 121 億円という大きな損害を引き起こした。

このような事件は国内だけでなく、世界中で発生している。アメリカのバーリントン郡では 2013 年 7 月に Dietz & Watoson の 7000 枚以上の太陽光パネルが屋根の上に設置されていた倉庫で同様な火災が発生している [16]。また 2016 年 5 月には Google などが出資して建設されたカリフォルニア州の世界最大級のイヴァンパ太陽熱発電所においても電気ケーブルからの出火し、短時間で消火されたものの操業再開まで多くの日程を費やすことになった [17]。



図 2.5: ASKUL 社の火災

2.2.2 National Electrical Code(NEC) 2017

それらの事件をうけてアメリカの電気事業における規制である National Electrical Code(NEC) では、太陽光パネルに対する特に急速なシャットダウン機能について規制を強める動きがある [2]。従来の NEC2014 は「10 feet ルール」と呼ばれ、図 2.6 のように太陽光パネルストリングの周囲 10 feet 以上の領域を 10 秒以内に 30 V 以下に落とす必要があるという規制であった。しかしこの状態では 10 feet 以内の部分での規制が特になく、また太陽光パネルのストリング単位での切断であるため、切断でも安全面の観点から万全であるとは言えないものであった。そこで NEC2017 では、10 秒以内に太陽光パネルストリングから 1 foot 以内は 80 V、1 foot より遠くでは 30 V 以下に電圧が低下するようにする必要があるという新しい規制が図 2.7 のように設けられることになっている。また NEC2017 の規定を満たしているというラベルが製品に貼られることになり、消防士はそのようなラベルを確認することで安全な消火活動が行えることになる。

このように従来より厳しい規約となる NEC2017 はアメリカの規制例であるが、消防士の安全性が担保されそれにより被害の拡大が防げるメリットがあることから、今後世界中の太陽光パネル市場でも大きな影響を与えられとされる。

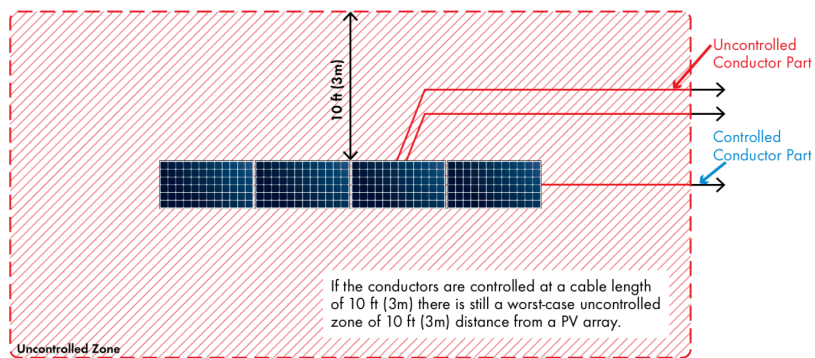


図 2.6: NEC2014[2]

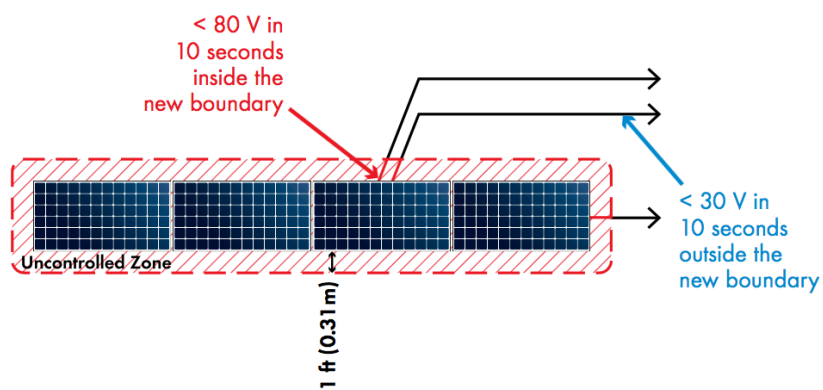


図 2.7: NEC2017[2]

第 3 章

関連技術

本章では前述した太陽光パネルの問題点を解決するために行われてきた関連研究について紹介する。3.1 では主にメンテナンスのために必要な通信などの情報收拾の方法について、3.2 では太陽光パネルの高電圧状態を解消する方法について述べる。

3.1 太陽光パネルとの通信

太陽光パネルアレイから故障した太陽光パネルを特定するためには、電圧値等データのモニタリングが太陽光パネル 1 枚単位で必要となる。しかし従来は多くの太陽光パネルに対して 1 枚ずつ電圧値と電流値をテスターなどで測定していたため、原因となっている太陽光パネルの特定に多くの時間とコストがかかっていた。そこでそれらの作業を自動化することを目的とした研究が多く行われている。その中で太陽光パネルとユーザの間で情報を伝達することは必須である。本章では主にその方針について場合分けを行った上で、最後にそれぞれの性能についてまとめる。

3.1.1 通信線の利用

太陽光パネルからの情報を集める手段として通信に着目した場合、一番簡単な方法としては RS485 などの通信線を新しく追加する方法が考えられる [18]。その中でも G.D.Hasenfus らは単にパネルのモニタリングをするだけでなく、電力線の切断を発見できるような回路を開発した [19]。その概略図を図 3.1 に示す。

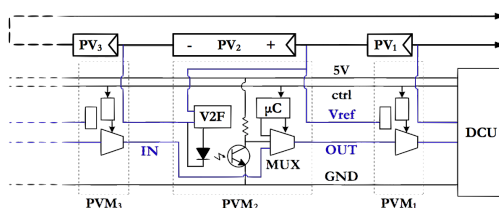


図 3.1: 通信線を利用した太陽光パネルモニタリングシステム [3]

彼らのシステムではそれぞれ独自の ID を持った太陽光パネルに取り付けられたモジュール (PVM) が独自の ID を持っており、太陽光パネルの電圧値をパルスに変換し ctrl 線を通して Data Collector Unit(DCU) に集約する。また例えば図中において PV_2 の電圧値は PV_3 の出力を基準として、 PV_2 の出力と比較することで算出されるのでこの値に重大な存在した場合、 PV_2 の電力線での異常であることを瞬時に判断することができる。RS485 のような通信線を利用するメリットとしては IP 通信を元にした高速な通信をほとんどパケットロス無しで通信できることが挙げられる。しかしこの方針はどこかの信号線が切れてしまうと、それ以降の太陽光パネルの情報が全て得られなくなってしまうという欠点がある。また全てのパネルへ配線を施す必要があり、これは太陽光パネルを数多く所有する大規模な発電所に適応する場合、大変なコストがかかると考えられる。

3.1.2 無線通信の利用

二つ目の方針として ZigBee のような無線通信を利用する方法が考えられる [20]。G. E. Preshner らは図 3.2 のようにパネル 1 枚 1 枚に無線モジュールを取り付け、自身だけでなく隣のパネルの異常も冗長的に検知できるようなシステムを開発した [21]。しかし無線モジュールを使用する欠点として、広い範囲で適応しようとした場合、そもそも通信が不安定になることや、余計な配線が結果として必要になってしまいうことが挙げられる。

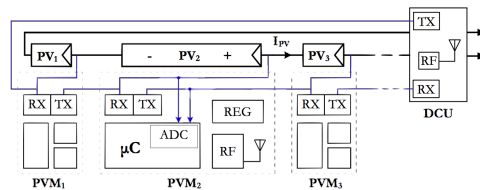


図 3.2: 無線通信を利用した太陽光パネルモニタリングシステム [3]

3.1.3 電力線の利用

三つ目の方針は電力線通信 Power Line Communication(PLC) を利用するものである [22]。これは電力線に電圧のパルスを発生させてそれらを信号として通信を行うものだが、単純に太陽光パネルに応用した場合、電力線にパルスを直接流入することになり太陽光パネルが故障してしまう可能性がある。またパルスが一つ隣の太陽光パネルには届くがそこを超えて伝達されないことや、パネル同士が直列で接続されているため参照する電圧値がパネルごとに異なりパルスの閾値の設定が困難であるといった問題点が存在していた。

P. Sirinamaratana らは図 3.3 のような電圧パルスを利用して従来の問題を解決した回路を開発した [3]。このシステムによる実験では、50 W の太陽光パネル 5 枚を用いて 2kbps のスループットを実現している。余計な配線が全く不要であるメリットがあるが、Sirinamaratana らの回路はかなり複雑になっており、これはモジュールの故障を引き起こす可能性がある。ま

た彼らの実験では、本来考慮すべきインバータ側のコンデンサによる影響を考慮しておらず、実際の状況でも同じように電圧のパルスが確認できるか確認する必要があると考えられる。

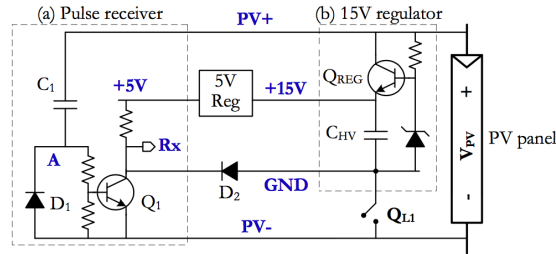


図 3.3: 電圧による PLC を利用した回路図の受信部 [3]

落合らは PPLC-PV により電流パルスを利用してより簡易な回路での通信を実現した [4]。従来のパネルに変調波が流入することによる問題を図 3.4 のような C_{bypass} を経由させることで回避した。また電流は直列回路において常に同じであることから電流パルスはより簡易的に pulse を生成、読み取ることができる。これによれば C_1 に太陽光パネルによってもともと電荷が十分溜まっている状態で、 Q_1 に Arduino 等のマイクロコンピュータから電流を流す。すると Q_1 を通して電流が流れる。この電流は C_1 により供給され、それと同時に L_1 にその電流は蓄えられる。 Q_1 をマイコンで OFF にすると、 L_1 に蓄えられた電流を D_2 を通して通常の電流に加えてパルスのような形で送ることができる。受信側では Current Transfer(CT) を用いて電流の変位を読み取り部分に流し、それらを抵抗によって電圧値に変換してマイクロコンピュータで読み取る。最初に Data frame が始まる合図として 11111111 と送信し、一定時間以内にパルスを受信しなければ 0、受信すれば 1 として信号を認識する。また実験において 20 枚のパネルを直列に接続した状態で、1kHz 程度のパルスによる通信を確認している。落合

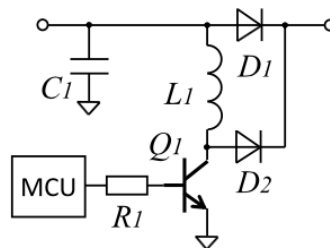


図 3.4: PPLC-PV 回路図 [4]

らのものはより回路がシンプルになっているが、こちらは実際に木更津高専の屋上にある太陽光発電施設で実験を行ったところ、パワーコンディショナの雑音によりうまく信号を読み取れなかったり、内部のマイクロコンピュータの電源である太陽光パネルの発電量が天候によって変化する結果、リセットを繰り返すような挙動をすることが確認されている。

3.1.4 ドローンの利用

また情報を集約する方法としてそのほかには、ドローンのような Unmanned aerial vehicle(UAV) を用いた手法も研究されている。Li らはドローンにカメラを取り付け、実際に太陽光パネル発電所で発生する主な問題のうち、スネイルトレイルや埃の遮蔽を発見することに成功している [23]。彼らの実験では現在のところ視覚的に確認可能なもののみを対象にしていたが、今後赤外線温度カメラや Photo Luminescence(PL)、Electro Luminescence(EL) 検査の追加により、目に見えない部分での劣化にも対応しようと考えている。これらの技術により従来のカメラを設置する方式 [24] と比較して大規模な太陽光発電施設においても必要カメラ数が少なく柔軟に対応できると考えられるが、UAV にはバッテリーの問題など検討すべき要件は多いと考えられる。

3.1.5 まとめ

これらの太陽光パネルとの通信方法を以下の表 3.1 にまとめる。このようにどの技術に対しても一長一短があり、現状として特定の技術を用いるのが最適であるとは言い切れないが、実環境での検証を十分に行えた場合において広範囲にも簡易に適応可能な電力線通信が最も優れていると考える。

表 3.1: 太陽光パネル間の通信技術の比較

	長所	短所
通信線	通信の確実性	余計なケーブルが必要 通信線のトラブル
無線	近距離で高効率	広範囲での適応性
電力線通信	余計なケーブルが不要	実環境での雑音耐性
ドローン	少数のカメラで広範囲をカバーできる	バッテリーの問題

3.2 太陽光パネルの切断

太陽光パネルは太陽が照りつける環境において発電を止められないという欠点を持つ。また人体に全く影響のない許容接触電圧が 50V 程度であることから、複数枚直列に接続された太陽光パネルは十分に人を感電させる危険性がある。しかし太陽光パネル 1 枚では感電により人体へ甚大な影響を及ぼすことはないという報告もあることから、本章では太陽光パネル単位での研究や実際の製品について紹介する [25]。

3.2.1 パネル単位での切断回路

F. Di Napoli らは MOSFET やスイッチを利用することで太陽光パネルの切り離しを実現した [5]。図 3.5 にその概観を示す。

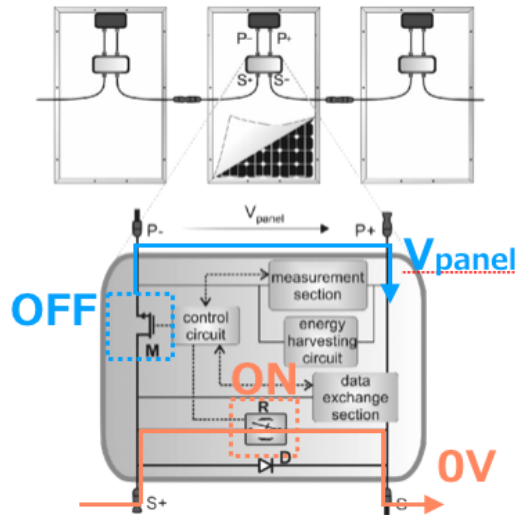


図 3.5: 太陽光パネルの切断機構 [5]

これによれば親機からの通常の heart beat を受信できれば正常とみなし、制御部は M_{R1} 側へ制御電圧を流し、太陽光パネルに並列に接続されたリレースイッチがオープンになる。これは図中の R がオープンであることを表し、 $S+$ から流入した電流は $P-$ 、太陽光パネル、 $P+$ 、 $S-$ と流れる。これに対し、親機から火災などの異常を知らせる信号を読み取った場合、制御部は M_{R2} 側へ制御電圧を流し、リレースイッチをクローズする。これは図中の R がクローズであることを表し、 $S+$ から流入した電流はこの R 部分を通り $S-$ 側へと流れる。これにより太陽光パネルのストリングを切断することが可能となっている。

またこの論文でのシステムでは PLC による通信も行なっている。しかし、このスイッチング機能だけでは異常と判断され一度スイッチをクローズしてしまうと短絡状態で電圧値が 0 となり、制御するためのマイコン等に電力が供給されなくなるので通信ができなくなる。そのため復旧させるためには別の電力線による電源を用意するか、手作業での復旧が必要となる。

そこでこの回路ではさらに太陽光パネルに直列で MOSFET M を接続したエネルギーハーベスティング回路を設置した。この MOSFET をマイコンで OFF にすると太陽光パネルは開放状態となり $P-$ と $P+$ 間で解放電圧を得ることができるので、一度切断してもマイコンの電源を確保できすぐに復旧することが可能になる。

3.2.2 Solar Edge Power Optimizer

多くの市販されている太陽光パネルの切断機能はストリング単位での切断機能である。しかし、ストリング単位で切断したとしても高電圧が発生することには変わりなく、消防士の危険性は完全になくなるとは言えない。その中で Solar Edge 社は DC-DC コンバータを搭載したモジュールをそれぞれの太陽光パネルに取り付ける Power Optimizer を発売している [26]。この DC-DC コンバータによって、MPPT トラッキング [27] だけでなく、モニタリングや緊急時にパネル単位での切断機能が提供される。問題点として1つのストリングに対して特別なパワコンが必要になることや、高電圧には対応していないことが挙げられる。

3.2.3 本研究の位置付け

通信・切断機能を広範囲な太陽光発電所に適応させることを考えた際の手間を想定した場合、PLC を用いることが最適であると考えられる。しかし PLC を用いた通信においてインバータや MPPT によるノイズ、天候条件によってどのような影響を受けるかが想定されていないことが多い。またパネルの切断機能についても同様である。本研究では通信手段として PPLC-PV の技術を用いた電力線通信を用い、現在機能として搭載されていないパネル単位での切断機能を導入したモニタリングと緊急時の回路切断システムを提案し、それに対し外乱があった場合にどのような影響を受けるかを検証したものである。これにより PPLC-PV でも、緊急時においてパネル単位での回路の切断が可能になり、より安全性を高めることができる。

第 4 章

提案手法

4.1 要件

本研究では、PPLC-PV によるパネル単位での電圧の管理の確認と、そこに切断機能を取り付けることで緊急時にも安全性を担保することを目標とする。このとき必要となる要素は以下の通りとなる。

- パネル 1 枚ごとに PPLC-PV の技術を用いた電力線通信により電圧値が取得されメンテナンスが簡略化
- 1 分程度ごとに 1 回データが更新される
- 切断命令等の実装のため Master モジュールと Slave モジュール間で相互通信が可能
- パネル 1 枚ごとに回路的な切断が可能なことによる安全面の確保
- MPPT などの雑音の原因となるものの存在下でも動作する

従来の PPLC-PV では Slave モジュールに該当する各太陽光パネルに設置されたモジュールから 30 秒に 1 度送信される信号を集約箱で CT を用いて読み取るが、切断機能を追加する場合 Master モジュールから命令を送り Slave モジュールがその信号を受け取る必要がある。そのため相互通信が必須である。データの更新回数としては、同様のモニタリング機能を持ったシステムの多くが採用している値を参考にしている。このようなモジュールとそれに伴うソフトウェアの作成が本研究の要件となる。

4.2 システム概要

主に通常時と非常時に場合わけを行う。通常時においては Master となるモジュールから heartbeat として一定時間ごとに broadcast 信号を送信し、ストリング上に存在する各 Slave モジュールに電圧値と温度を尋ねる信号を送信する。Slave モジュールにはそれぞれ自身に ID が振られていて、電力線通信による電流のパルスが電力線で重なり読み取れなくならないようにタイミングをずらして Master モジュールに返信する。このようにして電圧値と温度を常時収集することで、図 4.1 のように異常な値を示す太陽光パネルがないかをモニタリングする。

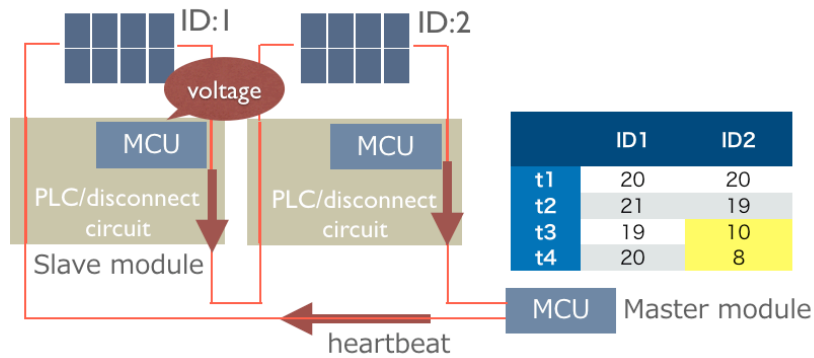


図 4.1: 提案システムのモニタリング

非常時はモジュールに施された切断回路によって太陽光パネルが安全にストリングから切り離される。このとき、切断状態に移行するのは以下の2つパターンが考えられる。一つめは図 4.2 のように Master モジュールからの heartbeat 信号を各 Slave モジュールが受け取れなかった場合である。この場合一定時間たってもこのような状態が続く場合は、各 Slave モジュールが電力線に問題が発生したと判断して自動的に切断状態に移行する。この切断状態は各 Slave モジュールが再び Master モジュールからの heartbeat 信号を受信した段階で解除される。

二つめは図 4.3 のように Master モジュールから切断命令を受け取った場合である。この切断命令は Slave モジュールの ID を指定して個別に行うことや、heartbeat のように broadcast で送信することが可能である。このように切断された場合には Slave モジュールは確かに切断したことを示す Ack 信号を Master モジュールに返信する。このため broadcast の場合は各 Slave モジュールはこの Ack 信号が混信しないように順次切断状態に移行することにする。この切断状態は前述の自動的に移行した切断状態とは異なるため、heartbeat を受信することで解除されることはなく、Master モジュールからの復帰命令を受信することでのみ通常状態に復帰できる。

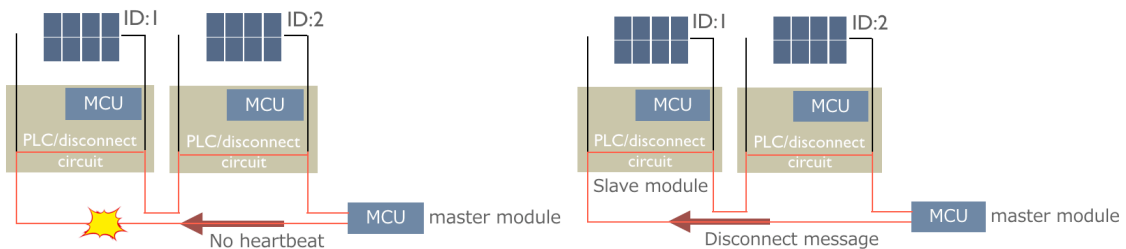


図 4.2: Slave モジュールが切断される例: heartbeat を一定時間受け取れない場合
 図 4.3: Slave モジュールが切断される例: 切断命令を受信した場合

4.3 実装する回路図

今回実装する回路は、従来の PPLC-PV によるものにリレースイッチを二つ追加で取り付けることで切断機能を取り付けたものである。中心となる機能を示した回路を図 4.4 に示す。

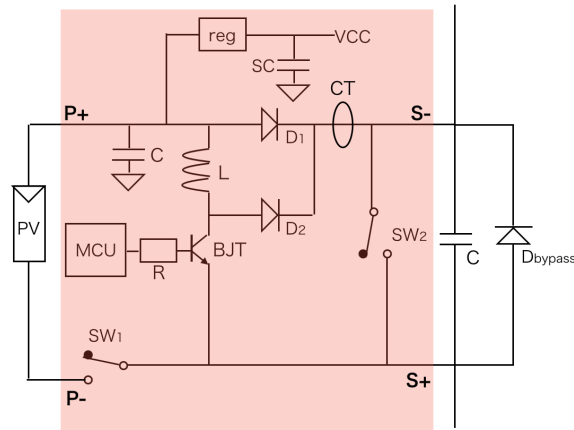


図 4.4: 回路図

PPLC-PV との違いはリレースイッチによる切断機能である。リレースイッチは NO(Normally Open) 接点と NC(Normally Close) 接点が存在し、リレーコイルに電源が接続されていないときは NC 接点との接続を確立し、リレーコイルに電源が接続されているときは NO との接続を確立する。初期設定としてどちらのリレースイッチも NO 接点に接続されている。リレースイッチ SW_2 はモジュール起動時はリレーコイルに電源を供給せず切断された状態であるが、緊急時にはリレーコイルに電源を供給し回路に接続するさせることで短絡させ、該当パネルをストリングから切り離れた状態にする。またリレースイッチ SW_1 はモジュール起動時からリレーコイルに電源を流すことで接続状態にしてリレーのない状態と同じにする。緊急時にはリレーコイルに供給する電源を切りスイッチを OFF にすることで太陽光パネル間には解放電圧を発生させ、MCU はこの開放電圧を用いて動くことができる。これにより切断状態でも MCU が信号を読み取り復帰することができる。

第 5 章

実装

5.1 ハードウェアの実装

提案の回路図に従ってモジュールを実装した。主に使用した素子は以下の通りである。

表 5.1: モジュール作成に使用した素子

素子	型番号	値
IC	ATmega328P	
トロイダルコイル		470 μ H
ダイオード (D_1)	SBM1045VSS	
ダイオード (D_2)	ER504	
リレースイッチ ($SW_1 \cdot SW_2$)	ALQ105	
トランジスタ	2SC4495	
スーパーコンデンサ (SC)		1 F
スイッチングレギュレータ	M78AR05-0.5	

パルスの読み取りや、リレースイッチの ON・OFF の切り替えのためのマイクロコンピュータは ATmega328P を利用した [28]。この ATmega328P の電源電圧は 1.8 V から 5.5 V であるが、これらの電源は太陽光パネルから得られる電圧を利用する。太陽光パネルから得られる電圧はこれらを大きく超えることから、スイッチングレギュレータである M78AR05-0.5 を取り付けることによって、ATmega328P に供給される電圧は 5 V に制限する。またスーパーコンデンサはモジュールのバッテリーの役割を担い、測定時に必要な電力や、悪天候時でも対応できるようにする意図を持って取り付けられている。

5.1.1 シミュレーション

LTSpice によって想定する回路のシミュレーションをまず行った。まずは太陽光パネル自体の設計を行う。今回実際に使用する太陽光パネルは SUNYOOO 製の SY-M12W-12 である。

太陽光パネルの性能は IV カーブによって表され、このパネルの IV カーブを図 5.1 に示す。

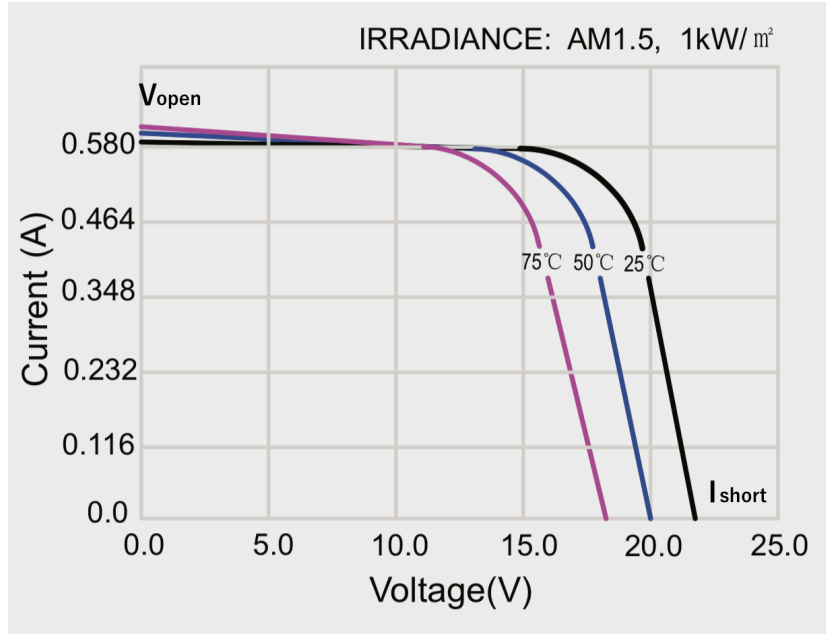


図 5.1: SY-M12W-12 の IV カーブ

このうち再現すべきなのはグラフの右端である回路が解放状態であるときに発生する開放電圧、グラフの左端である回路が短絡状態であるときに発生する短絡電流、 $I \times V$ の発電量 P が最大になる点の電圧と電流である。

この値を再現するために図 5.2 のような回路をシミュレーション上に用意した。このとき設

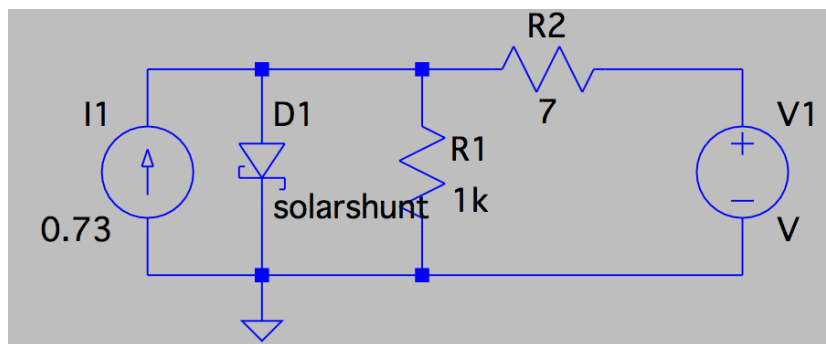


図 5.2: 太陽光パネルのシミュレーション上での回路図

計した solarshunt ダイオードのパラメータは伝達飽和電流 $I_s = 0.01 \text{ nA}$ 、内部直列抵抗 $R_s = 7 \Omega$ 、順方向電圧の倍数 $N = 27$ である。またシャント抵抗は $R_{sh} = 1 \text{ k}\Omega$ に設定した。これらはデータシートの IV カーブから算出したおよその値である。この値を用いて負荷にかかる電圧を 22 V までスイープさせて、その際の電流値がデータシート値に一致するかを確認した。実際に得られた値とデータシート値とを比較した結果を表 5.2 に示す。

表 5.2: データシート値とシミュレーションとの比較

	データシート値	シミュレーション値
開放電圧	21.8 V	22.44 V
短絡電流	0.73 A	0.73 A
V_{max}	17.4 V	15.8 V
I_{max}	0.69 A	0.67 A

多少の誤差は存在するものの、シミュレーションをする上で今回は大きな影響を及ぼさないと判断し、以後この素子を太陽光パネルと見立ててシミュレーションを続ける。

次に通信回路と切断回路が問題なく動作するかを図 5.3 にのような回路を組んで確認した。

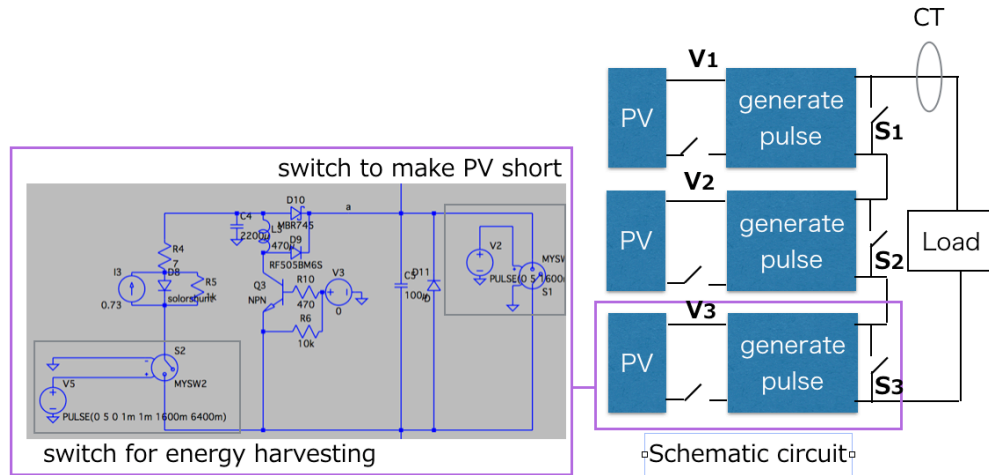


図 5.3: シミュレーション上での回路図

LTSpice で任意のタイミングでリレースイッチを ON や OFF にすることは困難であるので、実際に使用するものとは異なり周期的に発生するパルスの周期を調整して、このスイッチ部分を一定間隔ごとに S_1 、 S_2 と上から順番に ON にしていくことで、順番に太陽光パネルが短絡され電圧が減少していくかを、 $V_1 \cdot V_2 \cdot V_3$ の値を読み取ることで確認した。結果として図 5.4 に示すようなグラフが得られた。

スイッチを切断する間隔が短すぎると電圧が十分に落ちきらないまま次のパネルの切断に移行してしまうが、1.6 秒に設定するとパネルの電圧がほぼ落ちきった後に次のスイッチによる太陽光パネルの切断が始まっているので問題なく動作していることが確認された。このシミュレーションの結果を考えると、太陽光パネルの接続を順次切断する場合、前述の NEC の 10 秒で出力電圧を単一パネル分の 30 V 程度に落とすという制約を満たすためには、太陽光パネルのストリング枚数はおよそ 5 枚ということになり改善が必要であると考えられる。

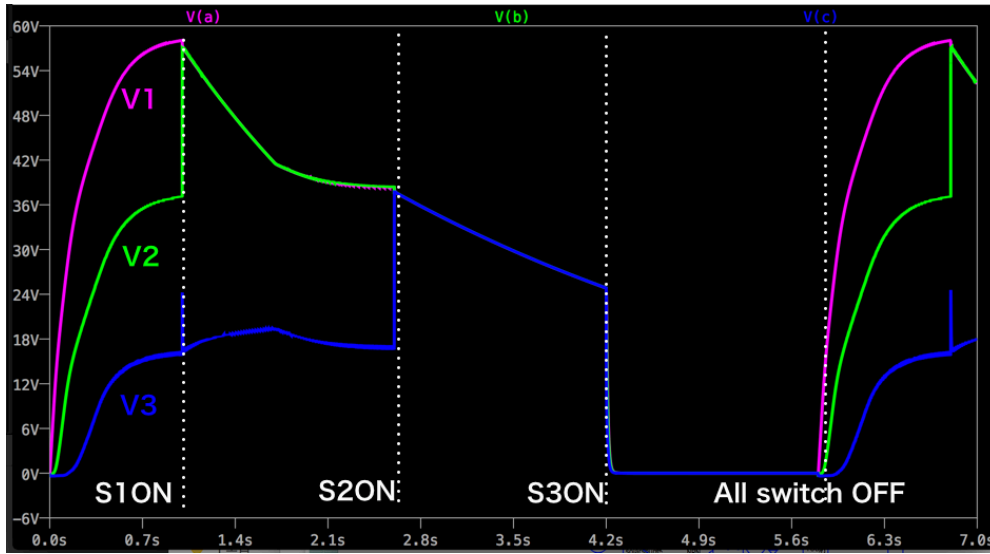


図 5.4: 1.6 秒ごとにスイッチを OFF にした場合の LTspice の出力結果

またレギュレータによって太陽光パネルの出力電圧をマイコンが壊れない 5V まで抑えられていることも確認した。しかしストリング全体でスイッチが ON になり全体の電圧が 0V になった際に、逆方向に電圧がかかってしまっているため、実際の運用ではパネル 1 枚分は切断することはしないなどの工夫を施す必要があることが判明した。

このようなシミュレーションを経て製作されたモジュールを以下の図 5.5 に示す。図中左上のコネクタ部分が太陽光パネルとの接続部分 ($P+$ と $P-$)、モジュール同士の接続部分 ($S+$ と $S-$) を表す。また左下のディップスイッチによってそれぞれのモジュールの ID を自由に設定できる。さらにその下には赤と緑の二つの LED が取り付けられており、電力線通信によって信号を送信した際には緑の LED が、信号を受信した際には赤の LED がそれぞれ点灯する。また切断状態であることを示す際には両方の LED が点灯する。

5.2 ソフトウェアの実装

モジュールのマイクロコンピュータとして ATmega328P を利用しているため、言語としては C++ を利用した。またパルスを作成するための Sender クラス、パルスを受信するための Receiver クラス、シリアル通信を行う Userserial クラス、その他の変数を取り扱う PVstatus クラスを作成した。

以下ではソフトウェアに関する実装について議論する。

5.2.1 パケット構造

本研究では送受信するパケットは以下の図 5.6 のように定義した。それぞれの機能は以下の通りである。

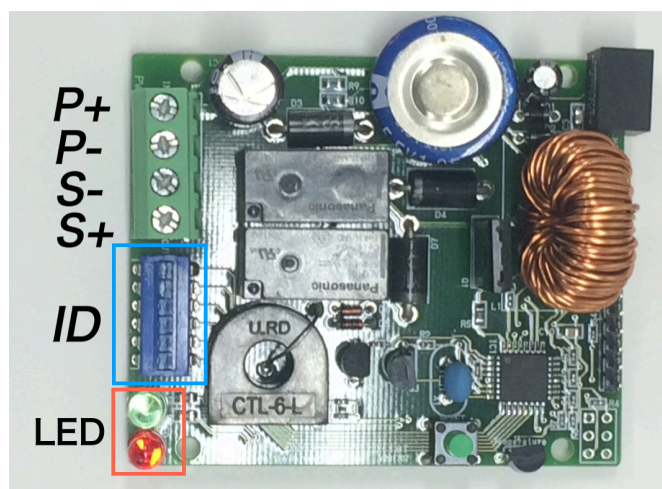


図 5.5: 作成したモジュール



図 5.6: パケット構造

- dest_ID : 1byte で送信先のモジュール ID を指定する。255 の場合は broadcast 信号であることを示す。
- command : 命令の種類を指定する。
- length : 以降のパケット長の長さを示す。
- Own_ID : 返信用に自分自身の ID を添付する。
- contents : 命令によってはこの中にデータを添付する。主な例としては、command が dataResp でデータの返信を示すとき、この中には該当パネルの電圧値と温度情報がこの contents の中に入る。
- CRC : パリティビットとして、受信データが問題ないかの検証に利用する。具体的には CRC パケット以外のパケットから 1byte のハッシュ値を算出する。

command の種類としては以下のものを用意する。

- Communicate : 文字列を送受信する。
- DataReq : Master モジュールから電圧等のデータを要求する。
- DataResp : Slave モジュールから電圧等のデータを送信する。
- Error : 自分に向けた命令を受け取ったが CRC が間違っていたりした場合を示す。
- Disconnect : Master モジュールから Slave モジュール回路切断を要求する。
- Disconnectack : Slave モジュールからただしく切断できたことを報告する。切断する前に取得した電圧値も送信する。

- Recovery : Master モジュールから Slave モジュール回路の切断状態の解除を要求する。
- Recoveryack : Slave モジュールからただしく切断状態から復帰できたことを報告する。復帰直後に取得した電圧値も送信する。

5.2.2 パルスの作成方法

モジュールがパルスを作成するには、マイコンのデジタルピンを ON・OFF させる。デジタルピンが ON になるとトランジスタに電流が流れ、コンデンサにためられた電荷がコイルにためられる。そしてトランジスタを OFF にすることでコイルにためられた電荷がダイオードを通して電流として流れる。このデジタルピンが ON になる時間は 200 usec である。これが長くなりすぎると太陽光パネルが短絡された状態が続きモジュールが破損する可能性がある。また信号の「0」、「1」を区別するためにトランジスタを OFF にする時間を変える。今回は「0」の場合は OFF の時間が 800 usec、「1」の場合は OFF の時間が 1600 usec としている。また信号の開始を示す preamble として「1」を 4 回流し、信号の終わりを示す Postamble としてトランジスタが OFF の時間が 5000 usec のパルスを 1 つ流す。このようにして電流によるパルスを電力線に生成する。この信号の概要を以下の図 5.7 に示す。

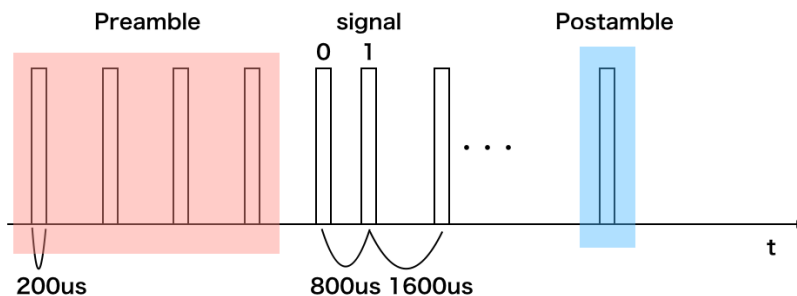


図 5.7: 信号の概要

このようにして作成された実際のパルスをオシロスコープを用いて測定した結果を以下の図 5.8 に示す。

このパルスを読み取れば最初に Preamble として「1」が 4 つ送信され、そこからパケットがスタートする。その後信号は 1byte ごとに 8bit 目、7bit 目と反対向きで送信されるため、この図のパルスを例にすれば 1byte 目は 00000010 で 3 を表し、これは ID3 の Slave モジュールに対する命令であることがわかる。その後も解読すれば 2byte 目は 1 で DataReq 命令であることを示す。3byte 目は 3 で length が 3byte であることを示す。4byte 目は 1 でこのパケットの送信者が ID1 の Master モジュールであることを示し、5byte 目はパリティビットとして 144 が付随する。最後に Postamble がこのパケットの終わりを示し、結局このパケットの内容は ID1 から ID3 への DataReq であることがわかる。

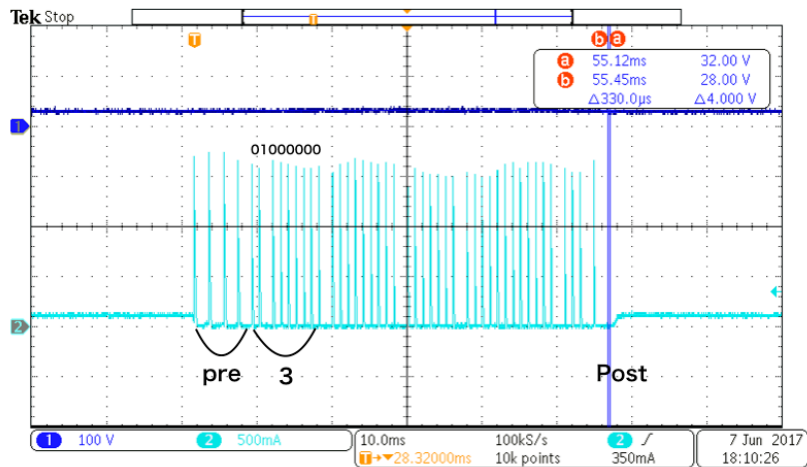


図 5.8: オシロスコープにより観測されたモジュールによるパルス

5.2.3 パルスの読み取り方

実際のパルスの読み方は以下の通りである。プログラムの中で電圧値を読み取る関数を while ループさせる。そして現在の電圧値を sig、一つ前の電圧値を psig として、sig が閾値を超えていて psig が閾値を超えていなかった場合、その sig をパルスとして記録する。今回の場合 Arduino のアナログピンによって $2^{10} = 1024$ 段階で電圧値を読み取っている。基準値として 512 を示すように回路上で調整されており、CT によってパルスの変異のみが伝わり抵抗によって電圧値に変換され、これが余剰分となりパルスとして観測される。そこでパルスを認識するための閾値の選定のため、電力線上のパルスの高さの測定を 1000 回分を行った。その測定値を以下の図 5.9 に示す。エラーバーは標本に基づいて予測した標準偏差の 1σ 区間を表している。

この電力線上のパルスは 3000:1 の CT によって 3000 分の 1 の高さの電流パルスに変換され、 3000Ω の抵抗に流すことによって元の電流パルスの高さと同じ数値の電圧パルスに変換される。今回測定した電流パルスの最低値は 1.62 A であり、アナログピンの読み取り値としては 840 程度となるのでこの前後に閾値をおけばいいことになる。

また観測されたパルスが「0」であるか「1」であるかの判定は duration_counter という変数によって行われる。電圧値を読み取る関数の while ループのなかでパルスを観測できなかった場合に duration_counter はインクリメントされ、パルスが観測された時点における duration_counter の値によって場合わけを行う。ただし ATmega328P のアナログピンの読み取り速度は 16 MHz であり、Arduino の標準関数である analogRead には ADC クロック周期 $\times 13$ サイクルとして通常実行に 100 μs 程度かかることが知られている。しかし電圧値を読み取る関数が再び呼び出される間にパルスが過ぎ去ってしまうことを防ぐためこの ADC クロック周波数に高速化を行った。通常 ADC クロックは 3bit 分の ADPS レジスタが全て 1 となっ

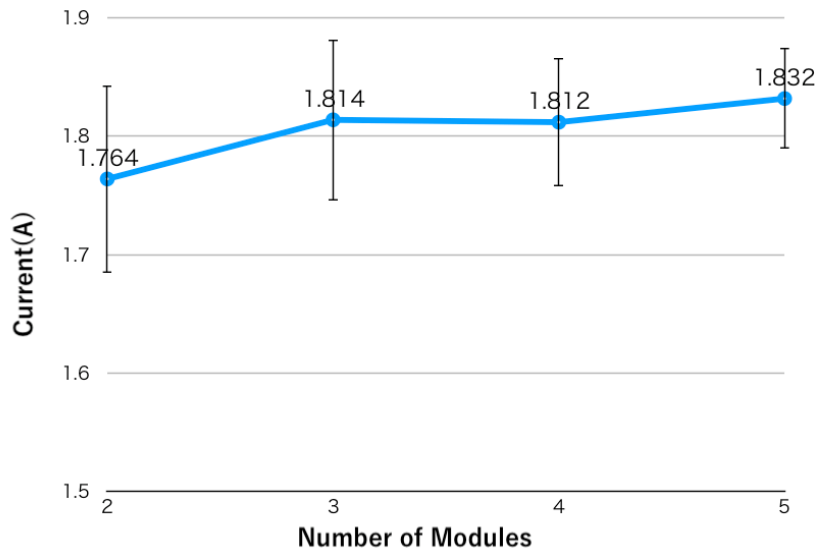


図 5.9: モジュールの個数によるパルスの高さの変化

ており、128 分周となった結果が上記である。そこで今回使用した ATmega328P 内では初期値として以下のレジスタ値を与えている。

Listing 5.1: 高速化

```
sbi(ADCSRA, ADPS2);
cbi(ADCSRA, ADPS1);
cbi(ADCSRA, ADPS0);
```

sbi と表記されている bit が 1 となるレジスタで、cbi と表記されている bit が 0 である。これにより ADC クロックの分周比は 16 分周となり、実行時間は 1/8 に高速化される。また正しく信号を読み取れているかの確認としてシリアル通信を用いて、PC の画面上にメッセージを必要に応じて表示させるようにしているが、このシリアル通信は Arduino の起動時に 9600 bps といった転送レートを指定する必要がある。今回はできるだけシリアル通信にかかる時間を少なくするためシリアル通信の速度として指定できる最高の速度である 115 200 bps を転送レートとして使用することでこちらでも高速化を行った。

この環境において duration_counter の値をどの程度に設定すればいいかを調べるため、モジュールの数によってこの値がどの程度になるかを測定した。この測定でも高さの測定に用いたサンプルを使用した。このとき「0」と「1」の割合はおよそ 7:3 であった。その結果を以下の図 5.10 に示す。エラーバーは標本に基づいて予測した標準偏差の 1σ 区間を表している。

このように「1」の duration_counter の値は 72.26 から 72.36 で標準偏差は 1.67 から 1.73、「0」の duration_counter の値は 38.11 から 38.15 で標準偏差は 0.39 から 0.49 であった。このことから duration_counter による閾値は 30 以上 60 未満である場合には「0」、60 以上 120 未満である場合には「1」となるように設定した。

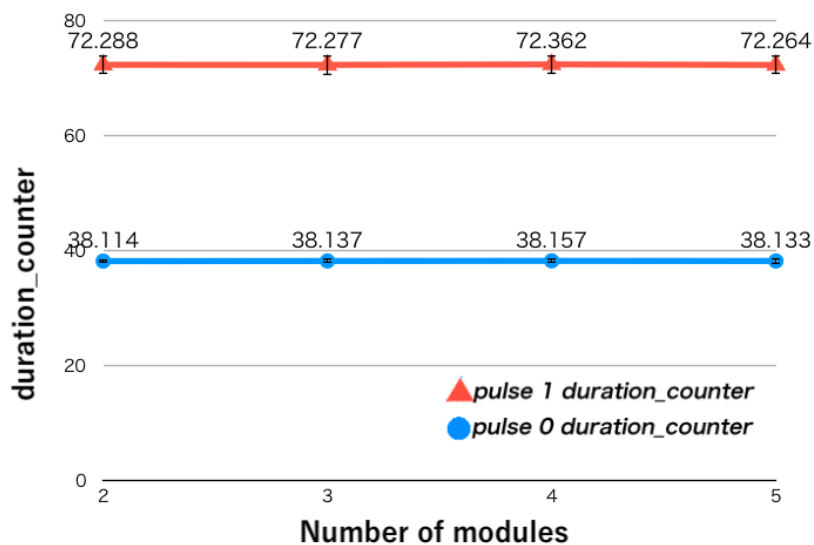


図 5.10: モジュールの個数によるパルスの高さの変化

5.2.4 割り込み用の Timer 関数

Arduino にはスレッド処理によるマルチタスク処理が基本的にはできない。そのため heartbeat を一定間隔で送信するといったタスクをさせるには Timer 関数を利用する。Timer 関数は Timer0 から Timer2 まで存在するが、Timer0 は Arduino で時間を管理する delay() 関数など一般的に利用される関数でも利用するものなので基本的には使えない。よって Timer1 と Timer2 を利用する。例として Timer2 の使用例を以下に挙げる。

Listing 5.2: タイマーの設置

```
#include <MsTimer2.h>
void heartbeat () {
}

void setup () {
  MsTimer2::set(20000UL, heartbeat);
  MsTimer2::start ();
}

void loop () {
}
```

この例を用いれば setup に設置された Timer2 が起動時に読み込まれ 20 秒ごとに heartbeat 関数を実行することになる。このように Master モジュールでは Timer2 を heartbeat 信号を送信するために使用する。

一方 Slave モジュールでは DataResp や DisconnectAck のような返信が混信しないように、heartbeat を受信してから一定時間待ってから返答を行えるように Timer2 を利用している。本研究では Slave モジュールは Master モジュールから broadcast で命令が送信された場合、自身の ID×1 秒だけ Timer で待ってから送信する。また Slave モジュールは heartbeat 信号を一定時間受け取れなかった場合は自動で切断状態に移行する機能を有する必要がある。このために別の Timer として TimerOne を設置する。本研究では Slave モジュールは heartbeat3 セット分が受け取れなかった場合に切断状態に移行するようにした。ただし TimerOne は 30 秒以上の長い間隔で使用することはできないので別途カウンターを設置し、TimerOne が 10 秒ごとにカウンターをインクリメントし、heartbeat を受信すればカウンターを 0 に、閾値を超えた場合に切断状態に自動で移行するという形で実装した。

5.3 GUI インターフェース

集めたデータの見せ方として図 5.11 のような Java による GUI インターフェースを用意した。実際に読み取れたパルスは右上のウィンドウに表示され、そこから読み取れる電圧値と温度を Slave モジュールの ID ごとに右下に表示される。またそのデータをグラフにしたものが左半分のウィンドウに表示される。また Send ボタンを左上に準備して実際に Master モジュールから命令を PC 上から送信することができる。



図 5.11: Web インターフェース

第 6 章

実験

6.1 室内実験

6.1.1 実験の様子

室内実験として梅澤無線電機株式会社の 9V の直流電源 STD-09025U を用意し、モジュールを 5 つ用意した上で実験を行った。負荷としては発熱を抑えるようにセメント抵抗 $300\ \Omega$ と耐高電圧 $47\ \mu\text{F}$ のコンデンサを 4 つを並列に接続している。その様子を以下の図 6.1 に示す。

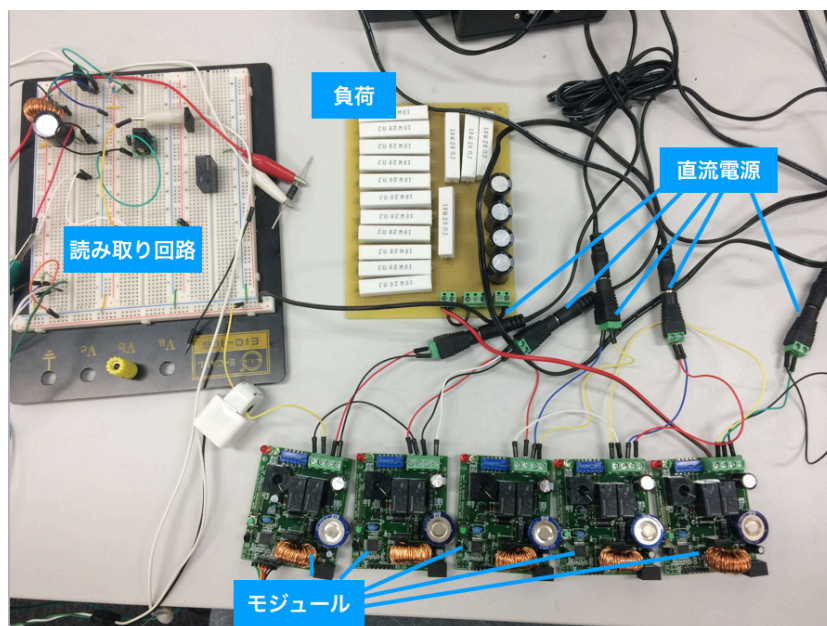


図 6.1: 室内実験の様子

このモジュールのうち、ID1 のものが Master モジュールとして機能し、それ以外が Slave モジュールとして機能している。通信の確認として 1 時間のデータを取った。この検証では 20 秒に 1 回 Master モジュールから heartbeat 信号を送信し、ID2 から ID5 までの slave モジュールの応答を確認した。これにより全 180 セット、720 個の応答信号が得られた。これら

のデータは別途用意した raspberry pi と CT、スクリー端子 C-08853 および USB オーディオ変換アダプタ PL-US35AP を用いた録音機能により採取されている。raspberry pi を利用したのは、ATmega328P と違い別スレッドで信号を読み取らせるためのフィルタをかけることができる点や、SD カードにより大量のデータを保存しておくことが可能だからである。また raspberry pi はアナログ信号を読み取ることができないため、今回はオーディオ変換による高速な AD 変換を利用した。これにより 44100 Hz で 256 段階のサンプリングが可能となるため、200 us 幅のパルスを十分に捉えることが可能であると考えられる。その後切断・復帰についても全体切断命令・全体復帰命令を用いて検証を行った。

6.1.2 通信機能の確認

上記の実験によって raspberry pi 内に保存されたデータの一例を以下の図 6.2 に示す。

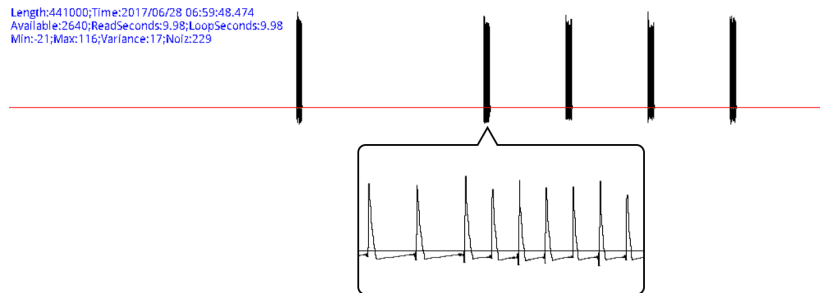


図 6.2: raspberry pi に保存された 10 秒間のパケットの様子

パケットの内容は以下の表 6.1 の通りであった。

表 6.1: パケットの測定結果

時刻	パケット	内容
11:21:58:75	255 1 2 1 161	heartbeat
11:22:01:02	1 5 4 2 9 20 107	ID2 の DataResp
11:22:02:02	1 5 4 3 9 20 58	ID3 の DataResp
11:22:03:02	1 5 4 4 9 19 202	ID4 の DataResp
11:22:04:03	1 5 4 5 9 20 218	ID5 の DataResp

このようにデータは 10 秒間隔で保存されおり、Master モジュールから heartbeat 命令が送信され、その後 ID2 の Slave モジュールが 2 秒後に、ID3 の Slave モジュールが 3 秒後に、と順次自身の電圧値と温度のデータを送信することが確認された。この様子は raspberry pi だけでなく PC に USB から接続し、音響分析ソフト Wavesufer を使うことでも確認することができる [29]。また室内環境ではほとんどノイズがなくデータが一つもかけることなく送受信できていた。

6.1.3 切断・復帰機能の確認

また全体の電圧測定用に Arduino を用意して、全体の電圧がモジュールによる切断復帰命令によりどのように変化するかを測定した。このとき元々の負荷抵抗が 300Ω であるのに対し、別途 20Ω のセメント抵抗を直列に接続し Arduino のアナログピンが読み取れる $5V$ 以下に電圧を抑えることに注意した。この Arduino には 300msec ごとに電圧値をシリアル上に表示するシンプルなプログラムを用意した。また Master モジュールからは全体への切断命令が送信されて、それぞれの Slave モジュールは自身の $ID \times 1$ 秒待ってから順次切断される。復帰の場合も同様で Master モジュールから全体への復帰命令が送信され、それぞれの Slave モジュールは自身の $ID \times 1$ 秒待ってから順次復帰する。その結果測定された切断命令による電圧の降下と復帰命令による電圧の上昇を図 6.3 に示す。

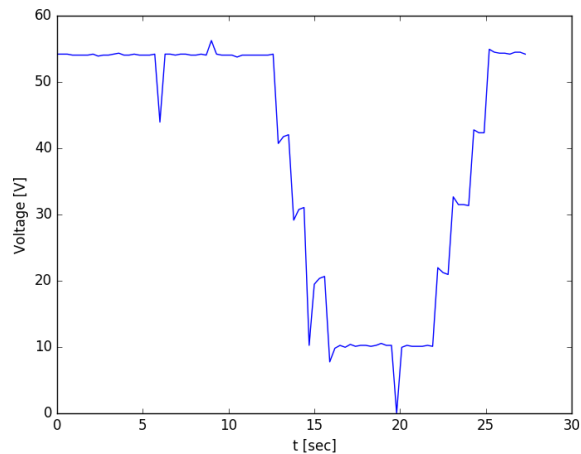


図 6.3: 切断回路によって電圧が順次落ち、その後復帰する様子

このように全体切断命令を送信してからほぼ 1 秒ごとに電圧が 1 パネル分降下していること、また全体復帰命令によって電圧が順次上昇することが確認された。また heartbeat を停止することで 1 分後に全てのパネルが切断状態に以降し、その後 heartbeat を回復するとそれを受信することによって全てのパネルが同時に復帰し電圧が一気に元の状態に戻ることも確認した。

6.2 屋外実験

6.2.1 実験の様子

次に実際の状況に近づけた状態で実験を行うために、晴れた日に屋外で太陽光パネルを5枚用意し、それぞれに作成したモジュールを取り付けて実験を行った。室内実験同様、MPPT機能を持ったインバータを挟むことなく雑音が少ない状態で、 $300\ \Omega$ の抵抗と $188\ \mu\text{F}$ のコンデンサを負荷として接続したのち、20秒に1回送られるmasterモジュールからのheartbeat信号と、ID2からID5までのslaveモジュールの応答を30分間raspberry piを用いて測定した。その後切断・復帰についても、Masterモジュールに接続したPCから全体切断命令・全体復帰命令を送信することで検証を行った。その様子を以下の図6.4に示す。

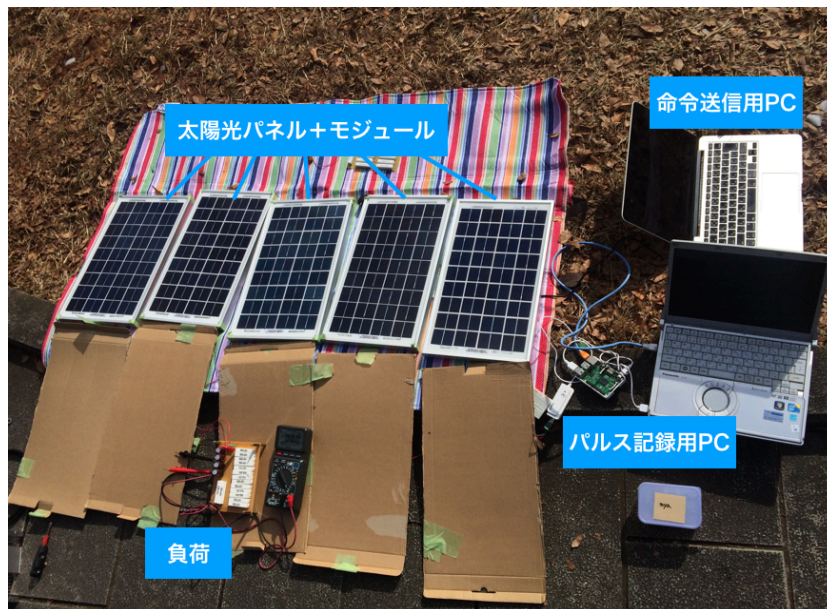


図 6.4: 屋外実験の様子

6.2.2 通信機能の確認

この状態で30分程度heartbeatによるパケットのデータをraspberry piで計測する実験を行った。得られたパケットのデータを図6.5に示す。

この図では100秒ごとに観測されたパケットと思われるパルス群の中で、実際に正しくパケットとして読み取れたものの個数を青、読み取れなかったものの個数を緑で表している。図中100秒から200秒と600秒から900秒では雲が太陽にかかったため、太陽光パネルの発電量が接続されたモジュールの電源に必要な電力を下回り、そもそもheartbeatを送ることができなかつたり、送ろうとしても途切れ途切れのものになって読み取り不可能なパケットとなって

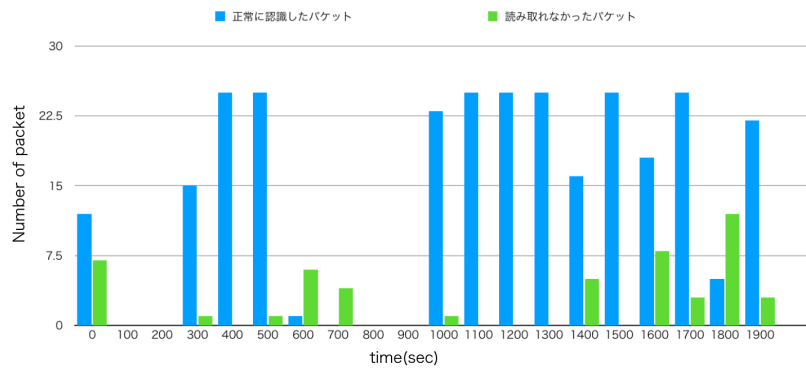


図 6.5: 観測されたパケットの時間ごとの読み取り率

いた。このような明らかに曇りであった場合を覗いた場合のパケットの送信成功率はおよそ 87% であり、全体を通して 84.91% となった。また本来あるべきパケットの数に対して実際に受信できたパケットの割合は 59.8% であった。

6.2.3 切断・復帰機能の確認

また切断機能の確認として室内実験と同様に、全体の電圧がモジュールによる切断復帰命令によりどのように変化するかを測定した。この実験ではマルチメータを用いて全体の電圧値を測定した。図 6.6 はマルチメータ上で切断復帰命令によって太陽光パネルが順次切断される様子であり、1 枚のパネルの発電電圧が約 20 V でストリング単位では約 100 V であったのがパネルの切断機能により最終的には Master モジュールの接続された太陽光パネル 1 枚分の電圧にまでに降下させることができた。1 パネル分の電圧が降下する時間はおよそ 1 秒であり、遅延なく電圧が降下することが確認された。また復帰に関しても同様の測定を行い、ストリングの電圧値が通常状態に戻ることを確認した。

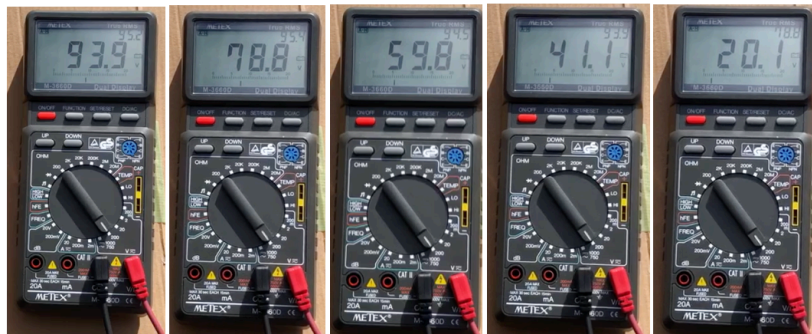


図 6.6: マルチメータによるストリング電圧が降下する様子

6.3 機能評価

要件定義として示した電力線通信によって、Master モジュールと Slave モジュールの相互通信を実現し、それらを用いて太陽光パネルをストリングから切り離すことが可能であることが実験によって示された。また 1 分間隔ごとにデータを更新することを考えると、今回は実験としてモジュール 5 つを用いた実験であるため検証はできなかったが、一つ一つのパケットの間隔が 80 msec 以上空いていれば raspberry pi では判別可能、ATmega328P では 200 msec で判別可能であったことから、モニタリング機能のみを想定した場合、raspberry pi を用いれば 1 分の間に最大で 750 枚、ATmega328P を用いれば 1 分間の間に最大で 300 枚のパネルに対して一つの Master モジュールで対応できることが明らかになった。切断機能を考慮すれば 10 秒でパネル 1 枚分まで電圧を下げる必要があることから、raspberry pi を用いれば 125 枚、ATmega328P を用いた場合では 50 枚のパネルに対して提案システムを提供できると考えられる。また実環境の実験によって雑音のない状態でも、実験において通信の成功率は 60% 前後しか得られなかった。特に曇りにおける通信成功率が著しく低下していることから、そのような状態でも安定して通信が可能になるように改良を施し、その上で MPPT などの雑音を発生させるデバイスを接続し、通信の実証実験を行う必要がある。

6.4 考察

実環境での実験によって、室内環境では見えてこなかった様々な問題点が観測された。曇りの場合に観測される代表的なパルス群を以下の図 6.7 と図 6.8 に示す。

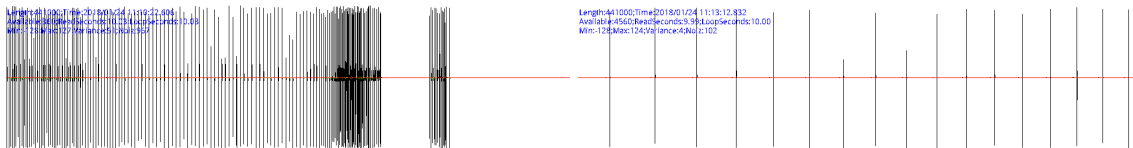


図 6.7: 曇り時に連続して観測されたパルス 図 6.8: 曇り時に一定間隔で観測されたパルス

連続して発生しているパルスは間隔が 40 msec、一定間隔で観測されたパルスは間隔が 400 msec ほどであった。このようなパルスは、現在別の場所で行われている PPLC-PV を用いた通信実験においても同様の現象は観測されているため、PPLC-PV を用いたモジュールによる問題点であると考えられる。パルスを生成する方法は ATmega328P のトランジスタに接続されているデジタルピンに電圧が付加することのみである。このピンは PD2(PCINT18/INT0) ピンであり、あるピンが HIGH から LOW または LOW から HIGH に変更される際に、外部割り込みをするためのピンに利用されることがある。ここから曇りの際には何らかの原因でこの外部割り込みが発生してしまっているのではないかと考えられる。また曇りの場合に、スイッチが短い間隔で ON・OFF を繰り返す挙動を示すことが何度

か確認された。今回のプログラムでは切断用の短絡スイッチと、ATmega328Pの電源用の解放スイッチはどちらもNO端子に接続されていて、ATmega328P起動時に電源用の解放スイッチにのみ電流を流し、接続状態にするようにしている。ここでATmega328Pの電源用の解放スイッチをNC端子に接続することで起動時に電流を流す手間を省いた場合、緊急時モジュールが故障することを想定した場合、常に太陽光パネルがストリングに接続されることとなるので、安全性が担保しづらい。しかし、どちらもNO端子に接続した結果として、スイッチが短い間隔でON・OFFを繰り返す挙動は発生したと考えられる。それは曇りによってATmega328Pの電源電圧が十分確保できなかったときに、一度機能が止まることによって両スイッチがOFFの状態になり、その結果として解放電圧が発生し、通常よりも電圧値が高くなる。よってATmega328Pが起動し電源用の解放スイッチがONになるが、これにより再びATmega328Pの電源電圧が足りなくなる、といった過程を経て発生していると考察されるからである。

またMasterから復帰命令を送ったのちに、各Slaveモジュールがのち回路を通常状態に戻したのちにRecoveryAckを送信するが、このRecoveryAckが2つめ以降のパネルに関してうまく送信されていないことが、図6.9のように観測された。図6.10はその返信の中でID3のSlaveモジュールからの返信を示したものである。ここから、最初のパケットの高さが小さく、また途中でパルスを生じることが発生していることがわかる。これはパルスの大元であるコンデンサに十分に電荷が溜まっていない状態と酷似しているため、現在の復帰回路では一つの回路を復帰状態にすると、他のモジュールのコンデンサに影響を及ぼすのではないかと考えられる。

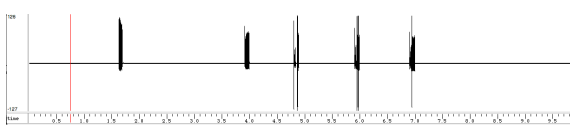


図 6.9: 復帰直後のパルスの乱れ

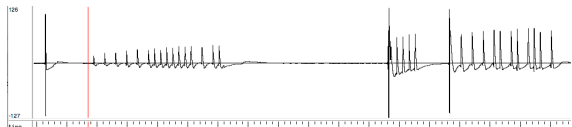


図 6.10: ID3 の返信パケット

ただし次のheartbeatに対して正しく返信していたことから、回路自体は正しく復帰できているがその確認が即座にできないだけであるため、改善の余地はあるが大きくシステムに影響を及ぼすものではない。

第7章

結論

本章では、本論文のまとめと今後の課題を示す。

7.1 まとめ

太陽光パネル発電所においてパネル単位でのモニタリングによるメンテナンスの簡略化と、緊急時にストリングからパネルを切り離すことによる安全性の確保することは重要である。そこで通信の手段として余計な通信線などが不要で広範囲への適応可能性の高い電力線通信に注目した。その中でもより簡易な回路で実現可能な PPLC-PV に対して、スイッチによる切断・復帰回路を追加することにより、太陽光パネルに取り付けることで可能なモジュールの開発を行った。また実験によりこの機能を評価し、このモジュールを用いたシステムの有用性を示した。

7.2 今後の課題

今後の課題としてはより現実の環境に即した雑音のある環境において、より多くのパネルを用いた検証を行うことが挙げられる。今回の屋外環境の実験によって PPLC-PV を単純に用いるだけでは曇りのような太陽光パネルの発電量が少ない状況では、モジュールの機能が意図せぬ挙動を示し、うまく電力のパルスを送信できないことが判明した。また切断機能においても、切断することとその状態から復帰することそれ自体はうまく機能しているが、その結果としてストリング上にパルスを歪める可能性が存在することから、これらを改善するためにより回路を洗練する必要があると考えられる。

ここに、MPPT のような外乱要素を付け加えた場合、単純な閾値によるパルスの存在判定では誤検知が多くなることが容易に予想される。ATmega328P による読み取りではマルチタスク処理ができないため、ほとんど受信した信号からパルスの判定を行う必要があるこの影響はかなり大きいと考えられる。現在パルスの読み取り方法として raspberry pi のようなマルチタスクによって受信した信号にフィルタリングをかけてノイズを除去しようとする研究もあるため、Master モジュールとしてこれを利用することも考えられる。しかし Slave モジュー

ルには ATmega328P が使用されているため、ATmega328P 上でもノイズ耐性を持たせた読み取りを実現するために、読み取り回路にフィルタをかけるなど工夫する余地がある。

また設置コストや製造コストについて、CT など高コストな素子も含まれているため、太陽光パネルに標準でついてくるモジュールとして大量生産しなければ莫大なものになってしまう。そのため日本においても NEC2017 に準ずるような制度を導入することによる義務化といった環境の変化も必要であると考えられる。

発表文献と研究活動

- (1) T. Kishimoto, H. Ochiai, Z Changming, K. Taichi, I. Masahiro, “Disconnecting PV Panel System using PLC,” TECO Green Tech International Contest 2017 (ポスター&デモ), Taiwan , 2017, Aug. 22.

参考文献

- [1] 独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電研究センター, “太陽光発電火災発生時の消防活動に関する技術情報,” Feb. 2014.
- [2] H. Knopf, “Evaluating the case for module-level shutdown,” Aug. 2015.
- [3] P. Sirinamaratana and E. Leelarasmee, “Diagnosis through series connected photovoltaic panels by pulse power line communication technique,” *Engineering Journal*, vol. 19, pp. 13–28, Dec 2014.
- [4] H. Ochiai and H. Ikegami, “PPLC-PV: A pulse power line communication for series-connected PV monitoring,” in *SmartGridComm*, 2016.
- [5] F. D. Napoli, P. Guerriero, and V. d’Alessandro, “Single-panel voltage zeroing system for safe access on PV plants,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, pp. 1428–1434, Jan. 2015.
- [6] A. Jäger-Waldau, “Snapshot of photovoltaics—march 2017,” vol. 9, no. 783, May 2017.
- [7] 環境省, “将来の社会システムの構築に向けた基礎的な検討,” 2013.
- [8] S. Kim, E. Y. Kwon, M. Kim, J. H. Cheon, S. h. Ju, Y. h. Lim, and M. s. Choi, “A secure smart-metering protocol over power-line communication,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2370–2379, Oct. 2011.
- [9] 消防研究センター, “太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策,” 2014.
- [10] B. Hossam and K. Itako, “Real time hotspot detection using scan-method adopted with P&O MPPT for pv generation system,” in *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Dec. 2016, pp. 1–5.
- [11] H. Yoshioka, S. Nishikawa, S. Nakajima, M. Asai, S. Takeoka, T. Matsutani, and A. Suzuki, “Non hot-spot pv module using solar cells with bypass diode function,” in *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996*, May 1996, pp. 1271–1274.
- [12] M. Vazquez and I. Rey-Stiole, “Photovoltaic module reliability model based on field photovoltaic module reliability model based on field degradation studies,” vol. 16, Aug. 2008, pp. 419–433.
- [13] IEC, “Amendment 1 - effects of current on human beings and livestock - part 1:

General aspects,” July 2016.

- [14] 独立行政法人労働安全衛生総合研究所, “感電の基礎と過去 30 年間の死亡災害の統計,” 2009.
- [15] S. kato, “埼玉県三芳町のアスクル倉庫火災、太陽光は翌日までに遮断.” [Online]. Available: <http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/feature/15/302961/071800056/?P=3>
- [16] S. Augenstein, “Dietz&watson warehouse blaze: solar panels hampered firefighting, officials say.” [Online]. Available: http://www.nj.com/burlington/index.ssf/2013/09/dietz_and_watson_warehouse_fire_solar_panels_make_battling_blaze_much_harder_officials_say.html
- [17] B. Mejia, “Fire breaks out at world’s largest solar power plant near nevada border.” [Online]. Available: <http://www.latimes.com/local/lanow/la-me-ln-solar-plant-fire-20160520-snap-story.html>
- [18] H. Ochiai, Y. Teranishi, and H. Esaki, “Facility networking with IP over RS485: Packet control for master-slave cascaded networks,” pp. 410–415, Nov. 2014.
- [19] G. D. Hasenfus, “Smart sensors for solar panels,” *US patent, US 2006/0162772 A1*, Nov. 2008.
- [20] *XBee/XBee-PRO ZB RF Modules User Guide*, Digi International.
- [21] G. E. P. Jr and C. J. Warren, “System and method for monitoring photovoltaic power generation systems,” *US patent, US 2006/0162772 A1*, Jul. 2006.
- [22] E. Roman, R. Alonso, P. Ibanez, S. Elorduizapatarietxe, and D. Goitiaz, “Intelligent pv module for grid-connected PV systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. Vol.53, no. 4, pp. 1066–1073, 2006.
- [23] X. Li, Q. Yang, Z. Chen, X. Luo, and W. Yan, “Visible defects detection based on UAV-based inspection in large-scale photovoltaic systems,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, pp. 1234 – 1244, Sept. 2017.
- [24] S. Salamanca, P. Merchán, and I. García, “On the detection of solar panels by image processing techniques,” in *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, July 2017, pp. 478–483.
- [25] S. Spataru, D. Sera, F. Blaabjerg, L. Mathe, and T. Kerekes, “Firefighter safety for PV systems: Overview of future requirements and protection systems,,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept. 2013, pp. 4468–4475.
- [26] “Solar edge power optimizer.” [Online]. Available: <https://www.solaredge.com/products/power-optimizer#/>
- [27] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions,” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1995.
- [28] *ATmega328/P-CompleteDatasheet*, Atmel, Nov. 2016.
- [29] KTH, “Wavesurfer.” [Online]. Available: <http://www.speech.kth.se/wavesurfer/>

謝辞

本論文を執筆するにあたり、大変多くの方にご指導、ご協力をいただきました。ここに心より感謝の意を示します。

まず研究の方針をはじめ多くのご指導をいただきました江崎浩教授に深く感謝致します。また本研究におけるモジュールの動作原理や設計など大変多くのことをご指導いただくとともに、メンタルの面や実験など幅広く見守っていただいたと感じる落合秀也准教授に深く感謝申し上げます。諸事務を通じて、研究室生活を支えてくださった江崎研究室秘書の高橋富美秘書、岩井愛映子秘書に深く感謝致します。

研究室のミーティングでの確かな質問やアドバイスによって、方向性を導いていただいた浅井大史博士、塚田学博士、中村遼博士に感謝します。電力線通信の基礎知識をはじめ、様々なアドバイスの使い方に関しても丁寧に教えていただいた池上洋行博士に大変感謝いたします。ネットワークに関する知識の乏しい自分に対し、手とり足とり教えていただくなどいつも気にかけていただいた中ボスである小林諭氏に感謝します。

2年間多くの時間を共に過ごし、苦楽を共にした同期である坂本裕紀氏 菰原裕氏、北畠知行氏、藺部啓氏に深く感謝します。

また台湾での Teco の発表において、全体を取りまとめていただいた趙長明先生、発表のサポートをしていただいたイ・ヒウンさん、GUI によるインターフェースをはじめとしたソフトウェアの面でサポートしてくれた幸田大智氏に感謝いたします。

また多くの良い先輩後輩に囲まれ、研究室での生活を楽しく過ごすことができたことに感謝します。

最後に、本論文の執筆にあたってお世話になりました家族、友人、お世話になりました全ての皆様に深く感謝致します。

付録

A モジュールの詳細な回路図

