
XMEGA® AU MCUとLoRa技術を用いる賢いIoT無線感知器

要点

- LoRaWAN規約の概要
- IoT応用に対するXMEGA AU MCUの特徴強調
- LoRa応用の概要
- LoRa感知器節点用実演ファームウェア
- 低電力の考察

序説

「我々が物のインターネット(IoT:Internet of Things)について話すとき、それは知性の埋め込みについての全てで、故に物はより賢くなり、それらは行うように提案されたよりも多くを行います。」 – ニコラス ネグロポンテ

物のインターネット(IoT)は今日の組み込みの世界で非常に一般的になっています。物のインターネットは強力な費用効率の良いマイクロコントローラ、効率的な無線規約、強化された感知器の集合です。IoT網はそれらの内部状態または外部クラウド環境での感知と通信のための組み込み技術から成ります。

IoT応用は低電力消費、安全な通信、接続された装置の拡大された無線通信範囲を要求します。これはより広い領域を網羅すると同時にとても良い電力効率をIoTシステムに許し、同様に長い電池寿命を達成するのにも役立ちます。

AVR® XMEGA® AUシステムのMCUは豊富な周辺機能、高性能、低電力の8ビットマイクロコントローラです。XMEGA AU MCUのpicoPower®技術とハードウェア暗号単位部はシステムに低電力消費、暗号化通信、安全なデータ記憶を許し、これはいくつかのIoT応用に対して重要です。

LoRa®技術はより広い到達範囲、より低い帯域幅、小さなパケット、応用層のデータの大きさと長い電池寿命の動作のような鍵となる特性を持つ低電力広域網(LPWAN:Low Power Wide Area Network)です。LoRaWAN網規約は安全な双方向通信、移動性と局所化のサービスのIoTの鍵となる必要条件を目標とします。

Microchip AVR XMEGA AUシステムのMCUデバイスとLoRa無線送受信単位部はIoT応用に対して理想的な、低データ速度、より長い通信範囲、低電力消費、安全で効率的な通信網のように鍵となる機能を提供します。

この応用記述はXMEGA AU MCUとLoRa無線技術を用いて実現される賢いIoT無線感知器節点を検討します。

応用記述はIoT応用に対するAVR XMEGA AU製品システムの最も重要な機能とLoRaWAN通信規約の概要を網羅します。追加されるIoT無線感知器節点ファームウェアはMicrochip ATxmega256A3BU MCUを用いて開発されます。このファームウェアはLoRa網に繋ぐための様々な方法(即ち、ABP,OTAA)をLoRa感知器節点に提供します。LoRa網への接続成功後、ファームウェアは周期的に感知器を監視して交換器を通して採取したデータをクラウドに基づく網サーバーに送信します。応用記述はシステム全体の電力消費を減らすためにXMEGA AU MCUに対する電力最適化技術も提供します。

目次

要点	1	5.1.11. RTCクロック元	17
序説	1	5.1.12. ウォッチドッグ	17
1. 定義	3	5.1.13. JTAGインターフェースとチップ上デバッグ	18
2. LoRaWAN規約の概要	3	5.1.14. 起き上がり遅延	18
2.1. LoRaWAN安全性	4	5.1.15. 仮想ポートレジスタ	18
2.2. 端末装置の個体設定と認証	4	5.2. コード最適化	18
2.2.1. 無線認証(OTAA)	4	6. 結び	18
2.2.2. 個体設定による認証(ABP)	4	7. 参考	18
2.3. LoRaWAN等級	5	8. 改訂履歴	19
2.3.1. 等級A端末装置	5	Microchipウェブ サイト	20
2.3.2. 等級B端末装置	5	お客様への変更通知サービス	20
2.3.3. 等級C端末装置	5	お客様支援	20
2.4. IoT応用に対するLoRa技術	5	Microchipデバイス コード保護機能	20
3. XMEGA AUデバイスの特徴	6	法的通知	20
3.1. AVR CPUと命令一式	6	商標	21
3.2. クロック系統	6	DNVによって認証された品質管理システム	21
3.3. ADC	6	世界的な販売とサービス	22
3.4. 事象システム	6		
3.5. DMA制御器	7		
3.6. 暗号エンジン	7		
3.7. USB	7		
3.8. picoPower® 技術	7		
3.8.1. 真の1.6V動作	7		
3.8.2. 最小化された漏れ電流	7		
3.8.3. 超低電力32kHzクリスタル用発振器	7		
4. 応用概要	8		
4.1. ハードウェア概要	8		
4.1.1. XMEGA-A3BU Xplained	9		
4.1.2. RN2483 LoRa技術Mote	9		
4.1.3. LoRa交換器基板	9		
4.2. 実演ファームウェア概要	10		
4.2.1. MCUクロックと周辺機能の構成設定	10		
4.2.2. ファームウェア動作	10		
4.3. 応用の流れ	12		
4.4. 実演構成設定	12		
4.4.1. 感知器節点配置	13		
4.4.2. LoRa交換器核基板配置	13		
4.4.3. LoRa機能パラメータ構成設定	13		
4.4.4. 感知器節点から TTNサーバーへのデータ送信	14		
4.5. 電力消費の結果	15		
4.6. プログラムとデータのメモリの必要条件	15		
4.7. 応用の結果	15		
5. 低電力の考慮	16		
5.1. MCU電力消費最適化	16		
5.1.1. 動作電圧	16		
5.1.2. 動作周波数	16		
5.1.3. クロック元選択	16		
5.1.4. クロック前置分周	16		
5.1.5. 活動動作の動作	16		
5.1.6. 休止動作	17		
5.1.7. 未使用周辺機能	17		
5.1.8. 未使用汎用入出力(GPIO)	17		
5.1.9. アナログ入出力	17		
5.1.10. 低電圧検出器(BOD)	17		

1. 定義

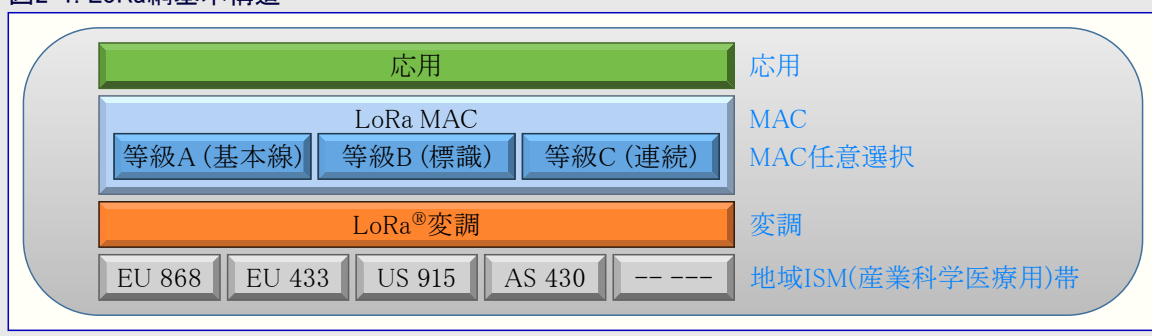
- **LoRaWAN**：長距離広域網 (Long Range Wide Area Network)
- **端末装置**(End-services)：端末装置はLoRa網での感知器節点です。
- **交換器**(Gateway)：交換器は端末装置と網サーバー間のメッセージを中継する透過型橋渡し部です。
- **網サーバー**(Network Server)：網サーバーには網内の活動節点の状態を管理する責任があります。
- **応用サーバー**(Application Server)：応用サーバーは使用者向けサービスで、節点の供給を管理する責任があります。これは使用者、応用、節点を管理するための容易な使用者ウェブ インターフェースを提供します。
- **上方向送信**(Up-link Transmission)：端末装置によって網サーバーへ送られるメッセージ。
- **下方向送信**(Down-link Transmission)：網サーバーによって端末装置へ送られるメッセージ。
- **端末装置アドレス**(DevAddr:End-device address)：これはLoRaWAN網内で端末装置を識別するのに役立ちます。
- **応用識別子**(AppEUI:Application Identifier)：これは接続(Join)要求中に応用を一意に識別するIEEE EUI64アドレス空間内の全域応用IDです。
- **網作業鍵**(NwkSKey:Network session key)：網作業鍵は端末装置に対して固有です。これはデータ パケットの信頼性と完全性を証明/確認するために網サーバーと端末装置の両方によって使われます。
- **応用作業鍵**(AppSKey:Application session key)：応用作業鍵は端末装置に対して固有です。これは応用本体を暗号化/復号するために網サーバーと端末装置の両方によって使われます。
- **端末装置識別子**(DevEUI:End-device Identifier)：これは端末装置を一意に識別するIEEE EUI64アドレス空間内の全域端末装置IDです。
- **応用鍵**(AppKey:Application key)：応用鍵は端末装置に対してAES 128根本鍵固有です。端末装置がOTAA認証経由で網と接続(Join)する場合、網通信と応用データを暗号化して確認するためにその端末装置に対してNwkSKeyとAppSKeyの両方を導き出すのにAppKeyが使われます。

2. LoRaWAN規約の概要

LoRa[Long Range Radio](長距離無線)はサブGHz無線RF技術です。LoRaは長距離無線通信接続を作成するために使われるハードウェアレベルでの物理(PHY)層または無線変調です。LoRa技術は長距離、頑強な通信、低電力消費を許すためにチャープ(時間と共に周波数が増加または減少する)スペクトラム拡散変調を使います。

LoRaWANはこのLoRa技術の上に構築した広域網(WAN:Wide Area Network)規約仕様です。LoRaWAN規約はLoRa物理通信層をインターネット網に拡張した媒体アクセス制御(MAC:Media Access Control)層です。LoRaWANは網に対する通信規約と系の基本構造を定義します。図2-1はLoRa網の各種層を示します。LoRaWAN規約と網基本構造は節点の電池寿命、安全性、網容量、サービスの品質、網によって扱われる応用の種類を決めることで最も影響力を持ちます。

図2-1. LoRa網基本構造



LoRaWAN網基本構造は一般的に星形接続形態で配置されます。図2-2は星形接続形態の構成図表示を示します。従って、LoRaWAN網は装置間通信を許しません。データ パケットは端末装置から網サーバーまたはその逆でだけ送信することができます。

LoRa網は125kHz帯域に対して0.3kbps～50kbpsのデータ速度を持つ、許諾不要の433MHz、868MHz、915MHzの産業科学医療用(ISM:Industrial, Scientific, and Medical)帯で動きます。LoRaWAN網規約は媒体アクセス制御機構を提供し、LoRa変調を用いて多くの端末装置に交換器と通信することを許します。

代表的なLoRa網は以下の要素から成ります。

- 端末装置
- 中央交換器
- 網サーバー

図2-2. 星形接続形態

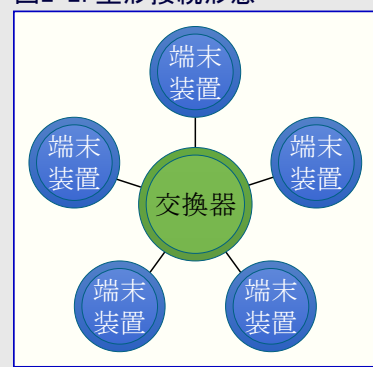
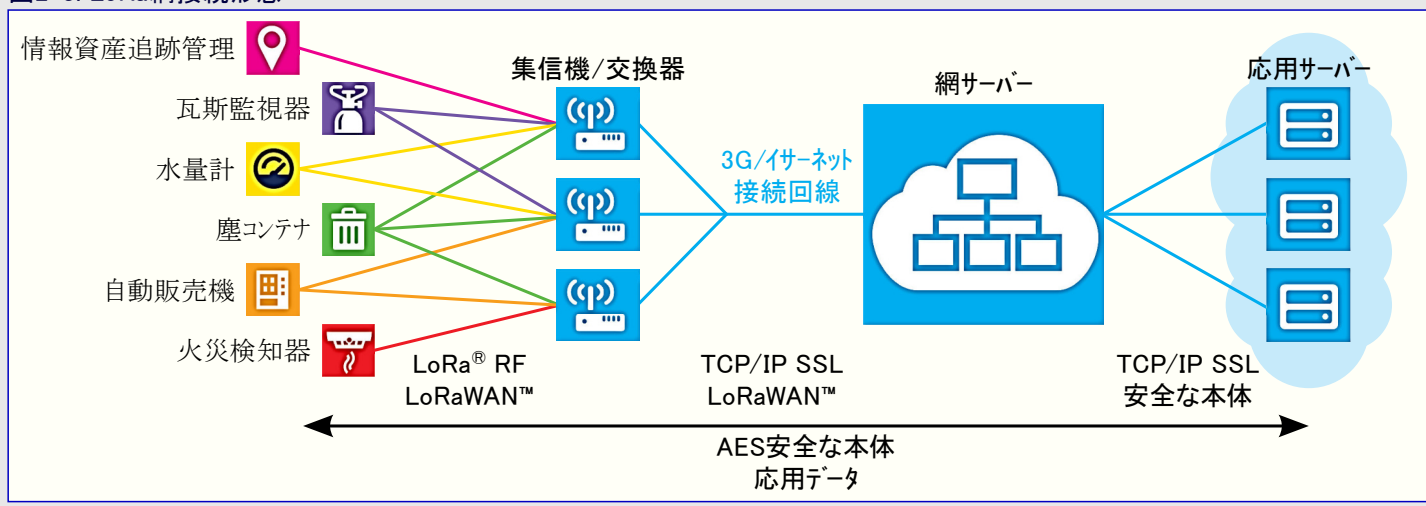


図2-3. LoRa網接続形態



端末装置は普通、現場でデータを感じ取る低電力感知器節点です。これらの節点はしばしば遠くに置かれます。LoRa網は複数の交換器を持つことができ、1つ以上の交換器によって同じデータパケットを受け取って転送することができます。

網サーバは知的でLoRa網での核となる要素です。これは網を管理し、安全性検査を実行し、冗長な受信パケットを濾過し、パケットを復号し、交換器を通して肯定応答を計画し、適応データ速度も実行します。応用サーバに対してパケットが意図される場合、網サーバは特定の応用サーバにパケットを送ります。応用サーバを用いて、使用者は更なる分析のために網サーバを通して端末装置からデータを受け取ります。加えて、応用サーバは端末装置の活動を決めます。図2-3は代表的なLoRa網接続形態を示します。

端末装置は中央交換器と通信するのに単一中継(シングルホップ)LoRa通信を使います。交換器は標準IP接続(例えば、イーサネット、Wi-Fi[®]、3G)経由で網サーバに接続されます。

終端通信は双方向です。端末装置と交換器間の通信は異なる周波数チャネルとデータ速度で拡散されます。データ速度の選択は通信範囲とメッセージ期間の間の二律背反です。スペクトラム拡散技術のため、異なるデータ速度での通信はお互いに干渉せず、交換器の能力を増す仮想チャネルの組を作成します。端末装置の電池寿命と網能力全体の両方を最大にするため、LoRaWAN網サーバは適応データ速度(ADR: Adaptive Data Rate)機構の方法によって各端末装置に対して個別にデータ速度とRF出力を管理しています。

2.1. LoRaWAN安全性

頑強な安全性はLoRa網に対する鍵となる要素です。LoRaWANの安全性設計は相互認証、完全性保護、秘密性のような基本的な特性を遵守します。LoRaWANの安全性はAES 128ビット暗号化算術を使います。LoRaWANの安全性は端末装置と応用サーバ間で交換される応用本体に対して端末相互間暗号を保証します。

LoRaWAN規約は安全な通信に関して網と応用レベルでのいくつかの異なる層の安全性を含みます。網の安全性は網での節点の信頼性を保証し、同時に応用層の完全性は網操作者が最終使用者応用データへのアクセスを持たないことを保証します。

2.2. 端末装置の個体設定と認証

LoRaWANに参加するため、各端末装置は個体設定(Personalization)されて認証(Activation)されなければなりません。認証後、装置アドレス(DevAddr)と応用識別子(AppEUI)、網作業鍵(NwkSKey)、応用作業鍵(AppSKey)が端末装置に格納されます。LoRaWAN網では2つの方法で個体設定と認証を達成することができます。

- ・ 無線認証 (OTAA: Over the Air Activation)
- ・ 個体設定による認証 (ABP: Activation by Personalization)

2.2.1. 無線認証 (OTAA)

無線認証法では、端末装置が網サーバとのデータ交換を実行するのに先立って接続(Join)手続きに従わなければなりません。端末装置は作業状況情報(session context information)を失う毎に新しい接続手続き通って行かなければなりません。

接続手続きは接続手続き(接続(join)要求-接続(join)受け入れ手続き)を開始する前に固有の端末識別子(DevEUI)、応用識別子(AppEUI)、応用鍵(AppKey)の情報で個体設定されることが必要です。

2.2.2. 個体設定による認証 (ABP)

ABP法は接続(join)要求と接続(join)受け入れの手続きを迂回して端末装置を特定の網に結び付けます。個体設定法による端末装置認証は、装置アドレス(DevAddr)と2つの固有作業鍵(網作業鍵(NwkSKey)と応用作業鍵(AppSKey))が端末装置内に予め直接構成設定されます。端末装置は開始時に特定のLoRaWAN網に参加するのに必要とされる上の情報と共に出荷されます。

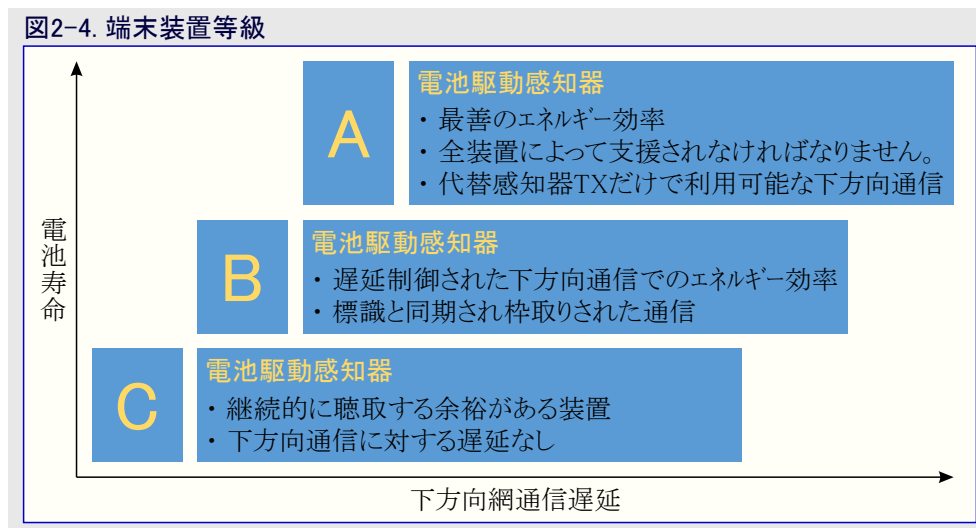
OTAA法は鍵が予め決められずに再生成することができるためより望まれる方法です。

2.3. LoRaWAN等級

様々な最終応用の側面をアドレス指定するため、LoRaWAN網は端末装置を以下の装置等級から利用します。

- ・ 等級A：双方向端末装置
- ・ 等級B：計画された受信枠を持つ双方向端末装置
- ・ 等級C：最大受信枠を持つ双方向端末装置

3つ全ての等級が双方向通信を許し、交換器経由でサーバーに上方向通信をすることができます。これらの装置等級間で鍵となる違いは網下方向通信遅延と電力消費間で行われる二律背反です。各等級は各種応用の要求を処理して特定目的に対して最適化された必要条件を持ちます。図2-4.は各種等級の端末装置に対する下方向網通信遅延対電池寿命を示します。



2.3.1. 等級A端末装置

等級A端末装置は2つの短い下方向通信受信窓が後続する各端末装置の上方向送信による双方向通信を許します。端末装置によって計画された送信枠は無作為時間原理に基づく小さな変動を持つ自身の通信要求に基づきます(ALOHA型の規約)。

この等級A動作は端末装置が上方向送信を送った直後にサーバーからの下方向通信だけを必要とする応用に対して最も低い電力の端末装置です。他のどの時点でのサーバーからの下方向通信も次の計画された上方向通信まで待たなければなりません。

2.3.2. 等級B端末装置

等級B端末装置はより多くの受信枠を許します。等級Aの無作為受信窓に加えて、等級B装置は計画された時間で追加の受信窓を開きます。端末装置に対して計画された時間でその受信窓を開くため、交換器から時間同期した標識を受け取ります。これは端末装置が聴取する時を知ることをサーバーに許します。

2.3.3. 等級C端末装置

等級C端末装置は送信する時にだけ閉じてほぼ連続して開く受信窓を持ちます。等級C端末装置は等級Aや等級Bよりも動作するのにもっと電力を使いますが、それらは端末装置通信に対するサーバーのための最低遅延を提供します。

LoRaWAN規約とLoRa技術のもっと詳細な情報については[LoRa連合](#)で入手可能なLoRaWAN仕様資料を参照してください。

2.4. IoT応用に対するLoRa技術

組み込み開発者は製品を物のインターネット(IoT)に接続するために多種多様な無線技術を持ちます。各技術は各種応用に適合し、範囲、データ速度、費用、電力消費、無線網能力のような要素を注意深く考察することを開発者に要求します。各無線技術は強い点と弱い点の両方を持ちます。例えば、標準Wi-Fiは高速で大量のデータを送信することができますが、制限された範囲を持ちます。携帯電話網は高速と長距離を組み合わせていますが、電力を大量消費します。低電力無線網はIoTに対する成功への鍵です。

IoT応用について、Wi-FiとBluetooth®技術のような確立した無線規約に勝るLoRa技術の重要な利点は長距離、低データ速度、接続した端末装置の低電力消費です。

これらLoRaの独特な特徴は健康監視、新型電力計測、都市光制御、環境監視などのような応用だけでなく工業応用でもそれを賢い感知技術のための興味ある候補にします。従って、LoRa無線技術はIoT、機械対機械(M2M)の市場区分で電池動作無線応用に対して不可欠です。

加えて、LoRaWAN網規約はLoRa連合によって支援される開かれた無料標準規格です。これはIoT応用のどんな特定の要求に対しても費用効果的に規約を独自化することを開発者に許します。

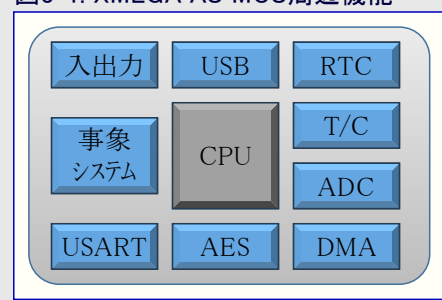
3. XMEGA AUデバイスの特徴

組み込み応用に対してはシステム性能が良いMIPS数よりも遥かに勝ります。最小の電力消費で滑らかに動くことを応用に許す強力な周辺機能とMCUに対する機能を持つことが重要です。

XMEGA AUはAVR強化RISC基本構造に基づく低電力、高性能、豊富な周辺機能のCMOS 8ビットMCUのシステムです。全てのAVR XMEGA AUは最小から最大のデバイスの全デバイスに渡って100%ピンとコードが互換です。どんなコードの変更もすることなく、どのXMEGA AUデバイスで開発しても、後で他のXMEGA AUデバイスに切り替えることが可能です。図3-1. はIoT応用に対して通常必要とされるXMEGA AU MCUの重要な機能を示します。

本項ではIoT応用に対して不可欠なXMEGA AU MCUデバイスの最重要機能が記述されます。

図3-1. XMEGA AU MCU周辺機能



3.1. AVR CPUと命令一式

CPU設計と命令一式は最小のコード量と最大の実行速度のために調整されます。AVR CPUは単一クロック周期で強力な算術論理操作を実行します。故に、XMEGA AUデバイスはMHz当たり100万命令/秒(1MIPS)近くの単位処理量を達成し、設計者に電力消費対処理速度の最適化を許します。

3.2. クロック系統

AVR XMEGAのクロック系統は柔軟な周波数の変更を許します。動的なクロック切り替えは応用に合わせて性能と電力消費を調節することを組み込み設計者に許します。内部PLLと前置分周器は更に応用の必要条件に合わせるためにクロック元を動的に高めるまたは低めるのに使うことができます。

組み込みの外部発振器障害検出と、温度と電圧に渡って±1%精度を持つ内部RC発振器で、XMEGA AU MCUは最高の安全性と最も信頼があり柔軟なクロック系統を提供します。

3.3. ADC

AVR XMEGA AU MCUは高いアナログ精度のための2つの16チャネル パイプラインADC単位部と高度に統合されます。この高性能12ビット パイプラインADCは200万採取/秒(2Msps)までの変換速度の能力があります。

ADC変換部は12段のパイプライン化された基本構造です。ADC単位部の全チャネルが変換のために同じADCパイプラインを使い、このパイプラインは各ADCクロック周期に対して開始されることを新しい変換に許します。従って、異なるチャネルからの複数ADC測定を同時に且つ独立して変換することができます。

広範囲な多重器(MUX)設定、統合された利得段、4つの仮想入力チャネルは、これをデータ採取、組み込み制御、一般的な信号処理のような広範囲の応用に対して適切で柔軟なADC単位部にします。

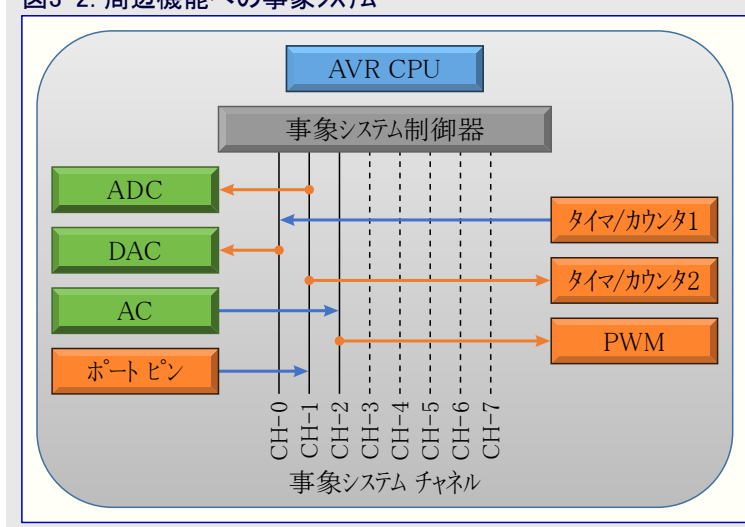
3.4. 事象システム

革新的なAVR XMEGA事象システムはCPUを巻き込むことなく他の周辺機能に直接信号(事象)を送ることを周辺機能に許します。これは短くて100%予測可能な応用時間を保証し、同時にCPUを開放します。図3-2.はXMEGA AU MCUでの事象システム制御器の使用例を示します。

図3-2.ではタイマ/カウンタ、PWM、ポートピンが事象発生部で、ADC、DAC、AC単位部が事象使用部です。

事象システムは活動動作とアイドル休止動作で活動します。他の全ての休止動作で事象システムは周辺機能相互通信に関して利用不能です。

図3-2. 周辺機能への事象システム



3.5. DMA制御器

AVR XMEGA AU MCUの4チャンネル直接メモリ入出力(DMA:Direct Memory Access)制御器は高速でデータメモリ空間内の何れかの位置と周辺機能間でCPUから独立したデータ転送を許します。

DMA制御器は以下の4つの異なる形式のデータ転送を支援します。

- データメモリからデータメモリへ
- データメモリから周辺機能へ
- 周辺機能からデータメモリへ
- 周辺機能から周辺機能へ

DMA制御器は柔軟なチャンネル優先権選択、いくつかのアドレス指定動作形態、2重緩衝能力を支援します。各DMA転送は1バイトから16Mバイトの範囲にすることができます。データ転送に対するDMA制御器の使用はCPUの計算能力を増し、休止動作でより多くの時間を費やすことをCPUに許すことによって電力消費を低めます。DMA制御器は信号処理と産業制御のようなデータ指向応用に対する強力な単位部です。

3.6. 暗号エンジン

AVR XMEGA AU系統のデバイスは64ビットDESと128ビットAESの暗号化と復号用の暗号エンジンを含みます。これらは各々、**DES** CPU命令とAES周辺機能単位部を通して支援されます。XMEGA AUデバイスの暗号エンジンは付加的な低電力必要条件で安全で高い帯域の転送を支援します。

今日の相互接続されたIoTの世界に於いて、電子装置の安全性は安全なデータ通信、処理、データ記憶に対して不可欠です。認証は端末装置が認証された交換器とクラウドサービスと相互作用してそれらが信用できるIoT端末装置と働くことを順に確認します。従って、AVR XMEGA AU MCUで利用可能な暗号エンジンはIoT応用に対して非常に有用な機能です。

3.7. USB

AVR XMEGA AUのUSB単位部はUSB 2.0準拠インターフェースで殆どの応用でUSBを統合するための効果的なUSB解決策を提供します。USB単位部は全速(12Mbps)と低速(1.5Mbps)の動作を支援します。

USB単位部は標準になっていて使い易い通信インターフェースです。IoT応用では内部的と外部的の両方で主なインターフェースとして統合するため、USBは設計者に対してもっと魅力的になります。IoT着用可能市場区分で、USBインターフェースはデータ転送と充電の目的に対して有用です。

3.8. picoPower®技術

増加する電池の使用と信号線給電応用は低電力解決策を要求します。超低電力8ビットAVR XMEGAマイクロコントローラの基本構造で使われつつある最も革新的なpicoPower®技術は業界の最低電力消費を達成します。休止は度々考慮される最も重要な低電力動作形態です。picoPower技術は最低休止動作電力消費に帰着する下の重要な技術を使います。

3.8.1. 真の1.6V動作

1.6V動作は真の1.6V動作です。これは全てのアナログ周辺機能、フラッシュメモリ、EEPROM、RAMが1.6Vで動くことを意味します。これは直接1.8V±10%電源からの安全な動作を許します。これは電池寿命を増すためにより深い電池放電も許します。

3.8.2. 最小化された漏れ電流

温度、供給電圧、製法が漏れ電流に影響を及ぼします。低電力動作用に特に開発された占有製法はpicoPower AVR XMEGA MCUの漏れ電流が100nA未満に減られています。

3.8.3. 超低電力32kHzクリスタル用発振器

活動動作で費やされる時間がパワーセーブ動作で費やされる時間に比べて重要になり得ないため、パワーセーブ動作は度々MCUの最も重要な電力消費特性です。AVR XMEGA MCUで使われる最新の32kHzクリスタル用発振器設計はパワーセーブ動作での電流消費をパワーダウン動作に匹敵する水準に減らします。

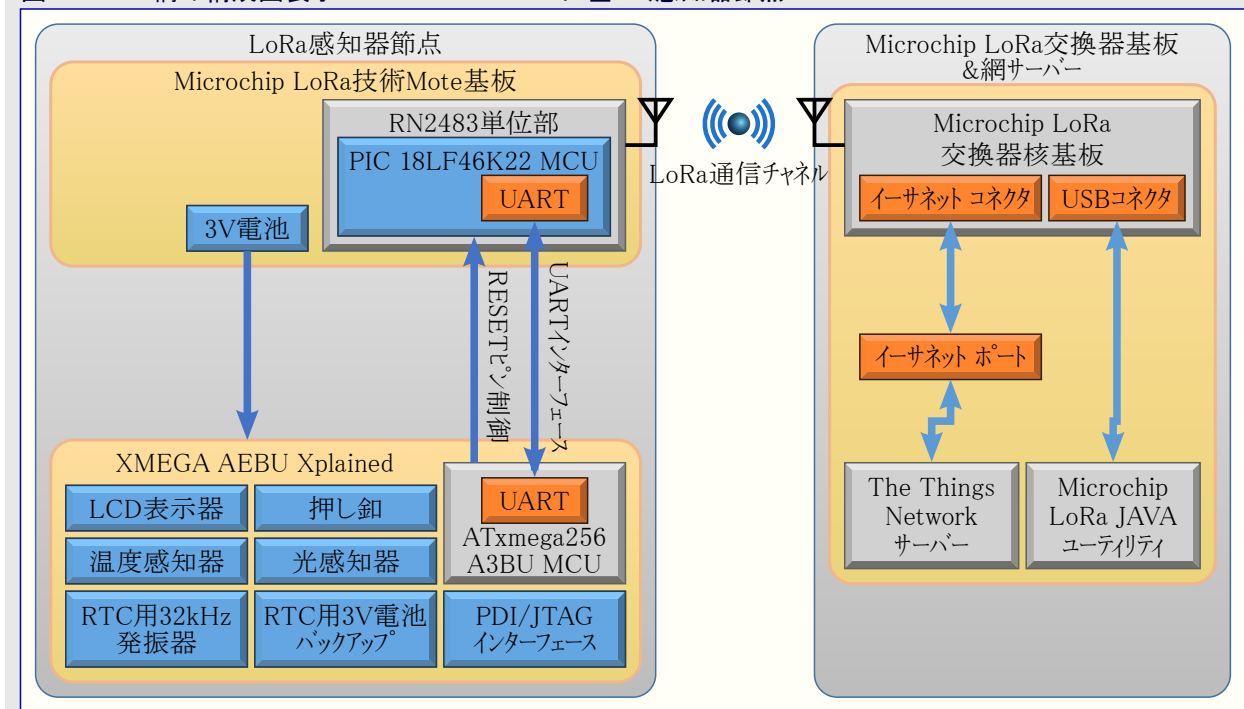
1.6Vの供給電圧と共にAVRのpicoPower技術は32kHz発振器走行とBOD休止で650nAの業界最低パワーセーブ電流消費を達成します。

4. 応用概要

この応用記述はXMEGA AU MCUとRN2483 LoRa送受信器単位部を用いて開発したLoRaに基づくIoT無線感知器節点を検討します。

この応用記述の範囲はLoRa感知器節点の開発だけに制限されます。Microchip LoRa評価キットで利用可能なLoRa交換器核基板が感知器節点と網サーバー間で必要な通信に対する交換器として使われます。公開標準網サーバーであるThe Things Network(TTN)は感知器設定からのデータパケットを受け取るのに使われます。Microchip LoRa開発ユーティリティ(GUI)は交換器とRN2483単位部の不可欠のパラメータを構成設定するのに使われます。図4-1はXMEGA AUに基づく感知器節点、LoRa交換器核基板、TTN網サーバーを用いて模式化したLoRa網の構成図表示を示します。

図4-1. Lora網の構成図表示 - XMEGA AU MCUに基づく感知器節点



電源投入後、LoRa感知器節点はLoRa網を繋ぐための要求を始めます。感知器節点は個体設定(Personalization)と認証(Activation)によってLoRa網を繋ぐことができます。LoRa網ではOTTAまたはABPの方法によって感知器節点をLoRa網に繋ぐことができます。一旦感知器節点が成功裏にLoRa網に繋がれると、感知器節点は周期的または任意の釐押下事象のどちらかで基板上の温度と光の感知器を走査します。処理された感知器のデータはLoRa交換器に送信され、それはThe Things Network(TTN)サーバーによってアクセスされます。TTNで構成設定される応用サーバーは受信した感知器データを表示します。確認した上方向送信データの成功裏の受信で、網サーバーは存在するならば下方向メッセージと共に感知器節点へ肯定応答を送ります。その後、感知器節点は次の感知器データ測定まで休止動作へ行きます。休止期間が過ぎると、感知器節点は休止から起きて、感知器の走査を開始して処理したデータを交換器を通して網サーバーへ送信します。

4.1. ハードウェア概要

この応用ではLoRa網の要素(即ち、感知器節点と交換器)が独自ハードウェア開発に代わって既存の評価基板を用いて実現されます。

LoRa感知器節点は独立型電池駆動端末装置で端末装置の等級A区分に属します。感知器節点は既存のATxmega256A3BU XplainedとRN2483 LoRa技術Mote評価基板を用いて形成されます。

注:・XMEGA-A3BU Xplained基板がATxmega256A3BU MCUと共に来るため、応用はATxmega256A3BU MCUで感知器節点を実演します。開発者はプログラムとデータのメモリ必要条件に依存してそれら応用に対してより少ないメモリ量を持つXMEGA AU MCUを考慮するかもしれません。

図4-1で示されるように、XMEGA-A3BU XplainedとRN2483 LoRa技術Mote評価基板はUARTインターフェースを通して接続されます。LoRa Mote基板上の3V電池供給元は両評価基板に給電します。

XMEGA-A3BU Xplainedの基板上の温度と光の感知器は周囲光と温度を監視するのに使われます。XMEGA-A3BU Xplained上のLCD表示器は接続状況、感知器データ、下方向送信データまたは肯定応答の反応を提供します。RTC32は電池代替機能と共に動きます。3Vの電池供給元と外部32kHz水晶用発振器はパワーダウン動作で給電してRTC32単位部に対するクロックを許可します。

RN2483 LoRa送受信器単位部はLoRa Mote評価基板上でただ許可されるだけです。基板上のLCD表示器、感知器、PIC MCUは感知器節点回路から分離されます。

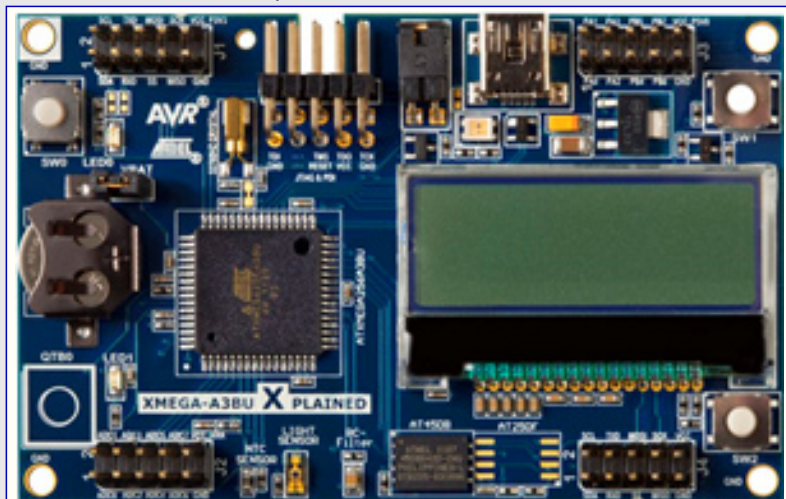
Microchip LoRa技術評価キットと共に利用可能なLoRa交換器核基板はLoRa網に対する交換器として使われます。交換器はイーサネットLANポート経由でTTNサーバーに接続されます。以降の副項はLoRa網を実現するのに使われる評価基板の簡単な概要を与えます。

4.1.1. XMEGA-A3BU Xplained

XMEGA-A3BU XplainedはATxmega256A3BU MCUデバイスから成り、3.3Vの供給電圧で動きます。図4-2はXMEGA-A3BU Xplainedの画像を示します。Xplainedキットの主な目玉の特徴は次のとおりです。

- 光と温度の感知器
- 3つの機械的な鈕
- 4つの状態表示LED
- USBポート
- 128×32ピクセルのFSTN LCD表示器

図4-2. XMEGA A3BU Xplained

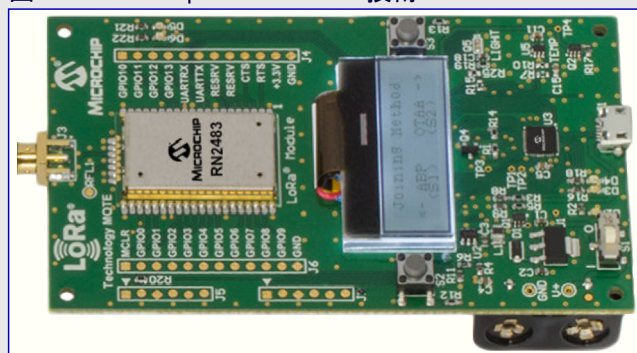


4.1.2. RN2483 LoRa技術Mote

RN2483 LoRa技術MoteはMicrochipのRN2483 LoRa変復調器に基づく等級A端末装置です。これは独立型電池駆動節点です。図4-3はMicrochip RN2483 LoRa技術Moteの画像を示します。MoteはLoRaWAN Ver. 1.0準拠交換器と基盤に接続する時に変復調の長距離能力を素早く実演するだけでなく、相互運用性を確認するのにも便利な基盤を提供します。

標準USBインターフェースはRN2483変復調器のUARTインターフェースへの橋渡しを提供する、ホストコンピュータへの接続のために提供されます。Microchip RN系統の製品と同様に、これは高位ASCII命令一式を用いて素早い構成設定と基板上LoRaWAN規約階層の制御を許します。

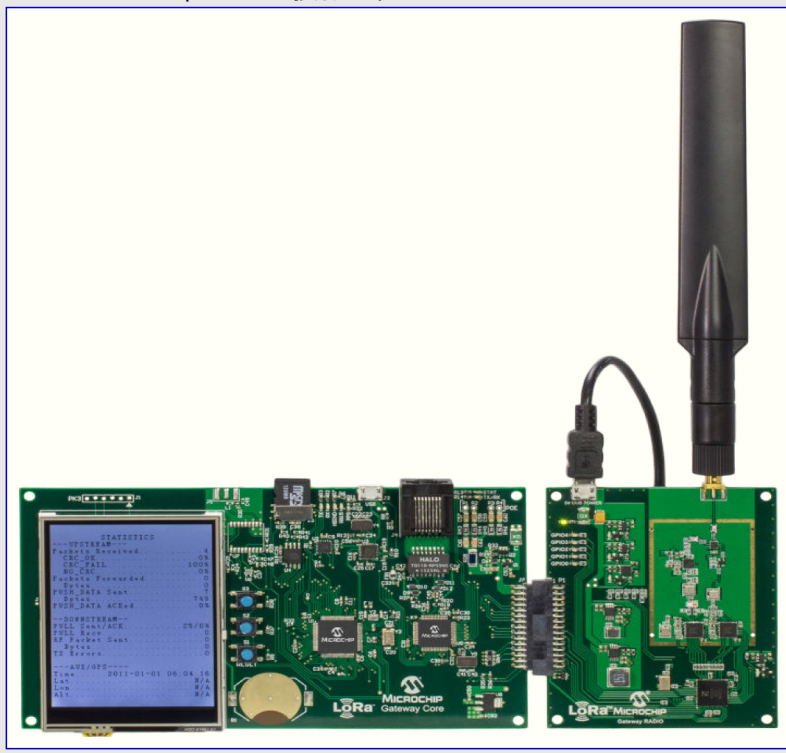
図3-2. Microchip RN2483 LoRa技術Mote



4.1.3. LoRa交換器基板

LoRa技術評価キットは1つのLoRa交換器基板と2つのRN2483 LoRa技術Mote基板と共に来ます。LoRa交換器基板はLoRa技術Moteとデータを送受信します。完全装備のLoRa交換器はLCD画面、構成設定データ用のSDカード、イーサネット接続、868MHzアンテナ、全帯域傍受ラジオを含みます。

図4-4. Microchip LoRa交換器基板



4.2. 実演ファームウェア概要

実演ファームウェアはATxmega256A3BU MCUに基づき、Atmelソフトウェア枠組み(ASF:Atmel Software Framework)とAtmel Studio 7.0 IDEを用いて生成されます。

4.2.1. MCUクロックと周辺機能の構成設定

LoRa感知器節点の実演ファームウェアでは48MHzのクロックを生成するために内部32MHz RC発振器がDFLLを用いて校正されます。DFLLに対する参照基準としてUSBフレーム開始(SOF)が使われます。48MHzのDFLLクロック出力は全速USB動作に使われます。DFLLクロックは12MHzの周波数でCPUを動かすために前置分周されます。

ATxmega256A3BU MCUの以下の周辺機能は望む感知器設定動作を実行するように構成設定されます。

- ・ A/D変換器(ADC)
- ・ 事象システム制御器
- ・ 直接メモリ入出力(DMA)制御器
- ・ 計時器
- ・ 実時間クロック(RTC)
- ・ 万能直列バス(USB)インターフェース
- ・ UARTインターフェース

4.2.2. ファームウェア動作

実演ファームウェア実装はUSBケーブル接続状況とSW0とSW1の押し釦状況に依存して下の2つの動作形態のどちらかでの応用動作を保証します。

- ・ USB動作
- ・ 感知器節点動作

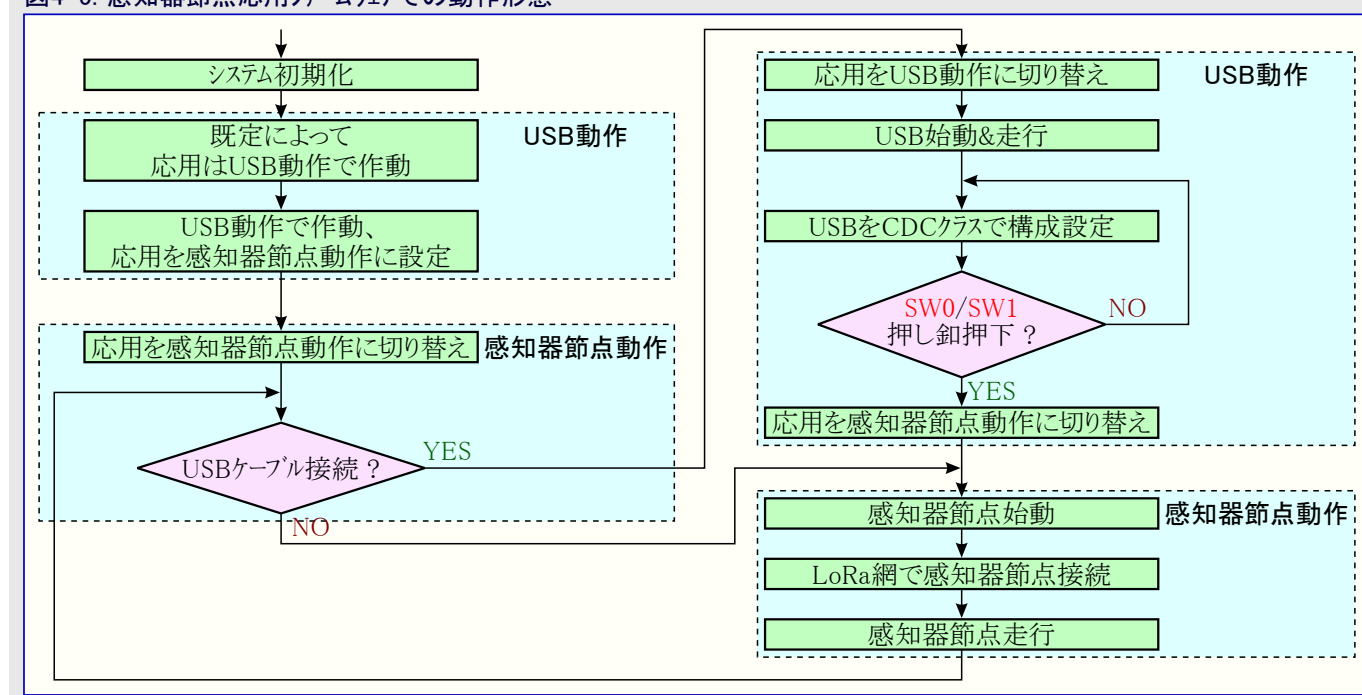
USB動作形態では、感知器節点がUSB電力で動きます。また、MCUはデータを送受信するのにUSB-UART橋渡しインターフェースを通してUSBホストと通信します。

一方で感知器節点動作では、感知器節点が電池電力で動きます。この動作では感知器節点がLoRa網に繋がってLoRa交換器を通して捕らえた感知器データを定期的にThe Things Networkサーバーへ送信します。また、感知器節点動作形態では、電力消費を減らすためにATxmega256A3BU MCUのパワーダウン動作も許可されます。

図4-5は感知器節点応用ファームウェアの2つの異なる動作形態の流れ図を示します。MCU電源投入後、既定により、応用はUSB動作で作動します。USB動作から応用は感知器節点動作形態へ切り替えます。USBケーブルが取り外されている限り、応用は感知器節点動作で作動します。

USBケーブルが取り付けられた場合、応用は感知器節点動作から出てUSB動作に切り替えます。この動作ではUSBがCDCクラスで動くように構成設定されます。任意の押し釦(SW0またはSW1)押下事象に対し、応用はもう一度感知器節点動作へ切り替えて望む動作を実行します。その後、応用はUSB接続状況を調べます。USBケーブル接続状況に応じて、応用は2つの動作形態のどちらかを続けます。

図4-5. 感知器節点応用ファームウェアでの動作形態



以降の副項はUSB動作と感知器節点動作のファームウェア実装を記述します。

4.2.2.1. USB動作

この動作ではATxmega256A3BU MCUのUSBインターフェースがPC(即ち、USBホスト)と感知器節点間の橋渡しとして働きます。USBインターフェースはMicrochip LoRa開発ユーティリティ(GUI)から来るデータを受け入れてそれをUSB-UART橋渡しを通してUART命令に変換し、これはその後UARTインターフェース上でRN2483 LoRa送受信器単位部に送信されます。

4.2.2.2. 感知器節点動作

実演ファームウェアに於いて、感知器節点動作は感知器節点機能を実現します。計時器単位部が応用に於ける時間基準を提供します。計時器は1ms毎に溢れ割り込みを生成するように構成設定されます。感知器節点動作ではLoRa網での動作成功のために感知器節点が以下の3つの異なる段階を通過て行きます。

感知器節点始動:

感知器節点始動は感知器節点が感知器節点動作形態に入ると直ぐに始まる最初の段階です。始動段階で、XMEGA-A3BU XplainedのLCD画面は感知器節点をLoRa網に繋ぐ様々な方法を表示します。その後、応用は適切な方法で使用者応答を待ちます。

感知器節点接続:

感知器節点接続段階では個体設定(personalization)と認証(activation)の手続きを通して感知器節点がLoRa網に繋がります。応用ファームウェアはSW0とSW1の各々の押し釦を用いて感知器節点認証のためにABPとOTAAの方法を手動で選ぶことを使用者に許します。

感知器節点走行:

一旦感知器節点がLoRa網で成功裏に繋がると、この段階での動作を継続します。感知器節点走行段階ではLCD画面が様々な使用者構成設定可能な感知器節点パラメータを表示します。これらのパラメータは表4-2で一覧にされます。応用はSW0/SW1での釦押下事象を監視します。SW0またはSW1のどちらかでの任意釦押下事象に対して、応用は感知器節点パラメータ構成設定動作に入ります。感知器節点パラメータ構成設定後、応用は不活動計数器が経過するまで何れかの釦押下事象を監視します。

不活動期間中に釦押下事象が報告されない場合、応用は何れかの周期的データ送信起動事象に対して調べます。データ送信事象が起動された後、応用はADC単位部を許可します。ADC単位部は16回連続繰り返しのために温度と光の感知器の平行データ採取を実行します。DMA制御器はどんなCPUの介入もなしにデータ緩衝部に平均した感知器データを格納します。その後MCUはADC、事象システム、DMA制御器を禁止し、UARTインターフェースを通してRN2483単位部にデータを送信します。

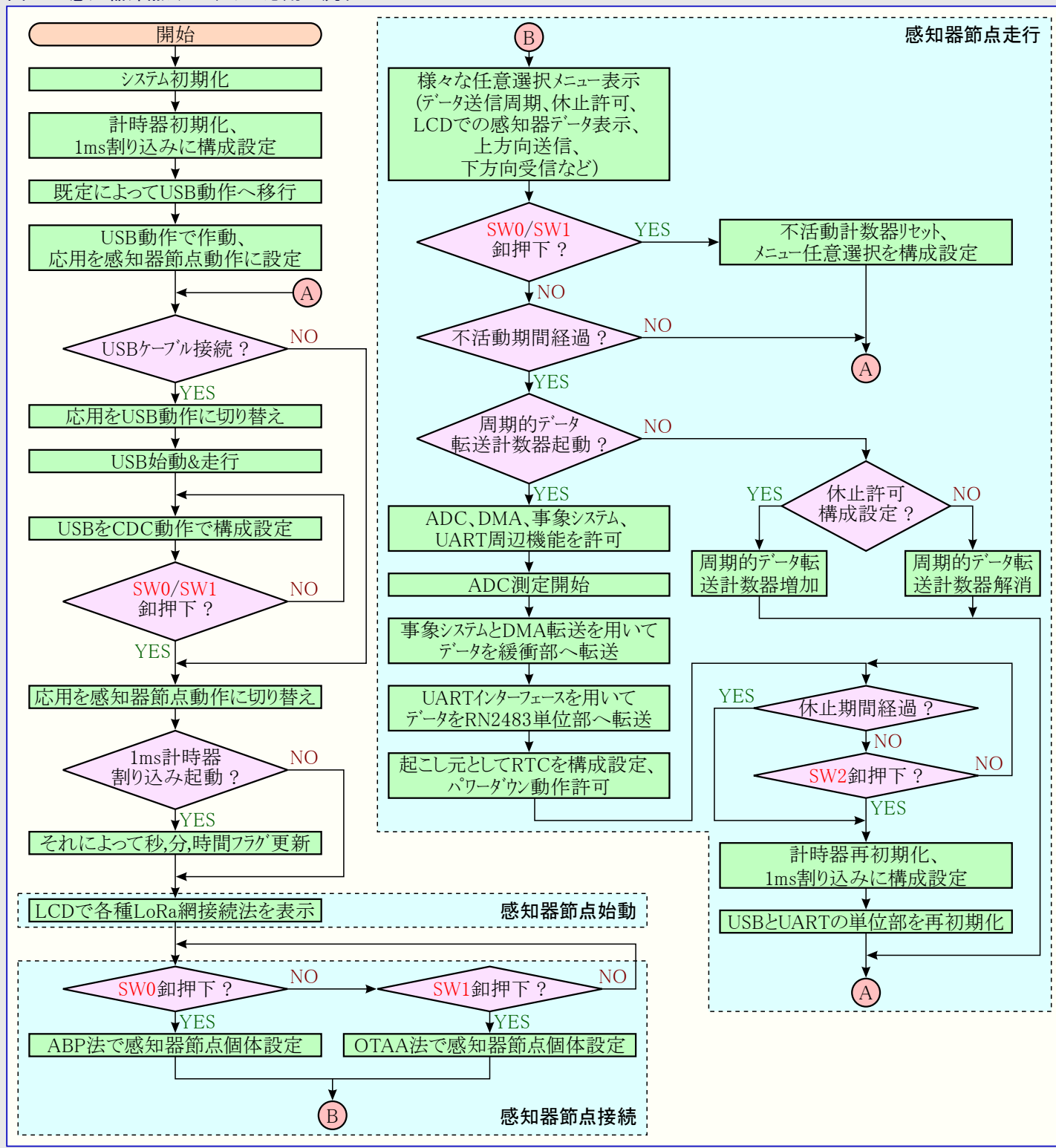
RN2483単位部はLoRa交換器を通してデータをTTNサーバーに送信します。TTNサーバーからの肯定応答の受信で、MCUはRTC単位部を許可し、他の全ての周辺機能を禁止してパワーダウン動作へ行きます。

MCUはSW2釦押下事象または休止期間経過後のRTC割り込みのどちらかで休止から起き上がります。その後、応用はUSBとUARTの単位部を再許可して感知器節点走行段階を続けます。

図4-6は感知器節点ファームウェアの応用の流れを示します。

4.3. 応用の流れ

図4-6. 感知器節点ファームウェアの応用の流れ



4.4. 実演構成設定

本項はLoRaハードウェア構成設定に従う段階の流れとThe Things Network(TTN)サーバーとMicrochip LoRa開発ユーティリティGUIを通して必要なLoRa機能パラメータ構成設定も記述します。

LoRa網ハードウェア構成設定は以下から成ります。

- XMEGA-A3BU Xplained
- Microchip RN2483 LoRa技術Mote基板
- Microchip LoRa交換器核基板

4.4.1. 感知器節点配置

図4-1.で示されるように、ATxmega256A3BUに基づく感知器節点はXMEGA-A3BU XplainedとMicrochip RN2483 LoRa技術Moteの基板を用いて実現されます。

RN2483 LoRa技術Mote基板では3Vの電池電源とRN2483 LoRa送受信器単位部だけが感知器節点によって使われます。

注: RN2483 LoRa技術Mote基板の残りの回路での電池電力の消費を防ぐため、基板上のPIC 18LF45K50 MCUをパワーダウン動作に置いてLCD単位部をOFFにします。

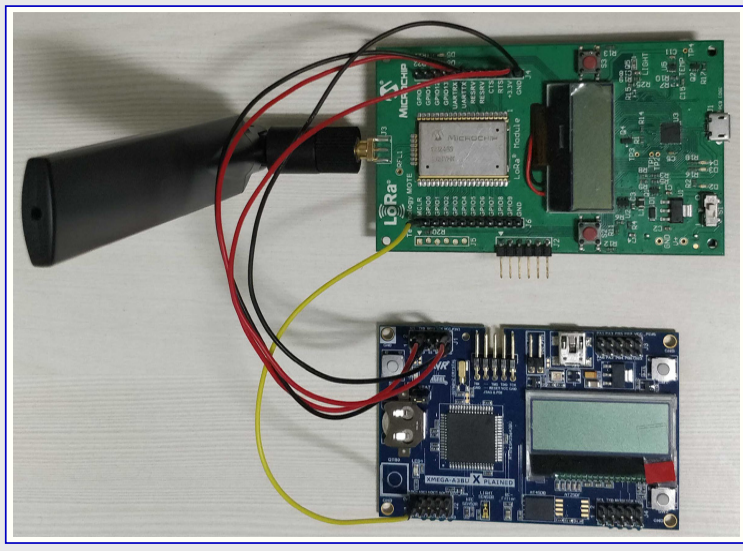
表4-1.はRN2483 LoRa技術Mote基板とXMEGA-A3BU Xplained基板間で必要とされる不可欠な接続を示します。

図4-7.はXMEGA-A3BU XplainedとRN2483 LoRa技術Moteの基板を用いる感知器節点配置を示します。

表4-1. RN2483 LoRa技術Mote基板と
XMEGA-A3BU Xplained間の接続

RN2483 LoRa技術Mote	XMEGA-A3BU Xplained
UARTTX (J4ヘッダの5番ピン)	TXD (J1ヘッダの4番ピン)
UARTTX (J4ヘッダの6番ピン)	RXD (J1ヘッダの3番ピン)
+3.3V (J4ヘッダの11番ピン)	P3V3 (J1ヘッダの10番ピン)
GND (J4ヘッダの12番ピン)	GND (J1ヘッダの9番ピン)
MCLR (J6ヘッダの1番ピン)	(J2ヘッダの2番ピン)

図4-7. 感知部節点配置



4.4.2. LoRa交換器核基板配置

LoRa交換器は感知器節点とクラウドに基づくThe Things Network(TTN)サーバー間の橋渡しとして働きます。LoRa交換器を構成設定してクラウドに基づくTTNサーバーに接続するには、ここ(<https://www.thethingsnetwork.org/labs/story/setting-up-your-own-gateway-and-endpoint-with-microchips-lora-technology-evaluation-kit>)で与えられる手順が非常に有用です。その後、交換器が”オンライン”でTTNクラウドサーバーに成功裏に接続されることを確実にしてください。

4.4.3. LoRa機能パラメータ構成設定

一旦交換器がオンラインで感知器節点がLoRa網に繋がれると、感知器節点はLoRa交換器を通してデータをTTNサーバーに送信します。上方向送信データはTTN計器盤の応用サーバーで現れます。感知器節点を成功裏に構成設定してLoRa網に繋げ、そしてまた応用で感知器データを見るためにも以下の手順に従うべきです。

ミニUSBケーブルをXMEGA-A3BU Xplained基板からMicrochip LoRa開発ユーティリティソフトウェアが走っているPCに接続してください。以降、LoRa感知器設定はUSB CDC動作で動きます。

LoRa開発ユーティリティソフトウェアで、”Find Devices(装置検索)”任意選択をクリックしてください。交換器基板がマイクロUSBケーブルを通して既にPCに接続されている場合、交換器と”RN単位部”の両方が装置一覧に現れます。それを構成設定するためにRN単位部を選んでください。

既定によって下で言及される命令に従うことにより、感知器設定はOTTA法を通して網に登録します。

1. TTN制御卓に於いて、応用または応用の装置画面からregister device(装置登録)任意選択をクリックしてください。
 - Device ID(装置ID)については適切な装置IDを入力してください。例えば、”loramotel”
 - Device EUI(端末装置識別子)については8パットの16進値を入力するか、または端末装置識別子を自動生成するために生成アイコンをクリックしてください。
 - 自動的に生成するためにApp Key(応用鍵)をそのままにしてください。
 - App EUI(応用識別子)については一覧から生成されたEUIを選んでください。
 - 終了するためにRegister(登録)をクリックしてください。
 - 制御は新しく登録された装置に向け直され、装置を認証するのに生成されたApp Keyの詳細が必要とされます。
2. ユーティリティのServer Authentication Keys(サーバー認証鍵)領域で、OTTA(無線認証)を選んでください。
3. “Use Entered (DevEUI)(入力された(DevEUI)を使用)”を選び、TTN制御卓からDevice EUIを複製してください。
4. TTN制御卓からApp KeyとApplication EUIをLoRa開発ユーティリティソフトウェア内の適切な箱に複製してください。
5. 各値入力後、情報がRN単位部に送られるを確実にするためにPCキーボードで”Enter”キーを押してください。

6. “Save(保存)”任意選択をクリックしてください。
7. “Join(接続)”任意選択をクリックしてください。
8. その後、RN単位部の制御卓で“ok”と“accepted(受け入れしました。)”の応答が現れます。

OTTA法によって感知器節点登録後、ABP接続法に切り替える場合、以下の変更が必要です。

1. TTN制御卓で、個体設定が必要な端末装置へ行ってください。
 - 右上のメニューからSetting(設定)任意選択を選んでください。
 - Activation method(認証法)についてABP任意選択をクリックしてください。
 - 制御卓によって自動的にNetwork Session Key(網作業鍵)とApp Session Key(応用作業鍵)を生成するために、どの情報も入力しないでください。独自化した鍵情報を手動で入力するにはcustomize it(それを独自化)任意選択をクリックして詳細を入力してください。
 - 終わるためにSave(保存)をクリックしてください。
 - 制御は装置に戻され、装置を認証するのにDevice Address(端末装置アドレス)と作業鍵が必要とされます。
2. ユーティリティのServer Authentication Keys(サーバー認証鍵)領域で、ABP(個体設定による認証)を選んでください。
3. “Device Address (DevAddr)(端末装置アドレス(DevAddr))”を選び、TTN制御卓からDevice Addressを複製してください。
4. TTN制御卓からNetwork Session Key(網作業鍵)とApplication Session Key(応用作業鍵)をLoRa開発ユーティリティ ソフトウェア内の適切な箱に複製してください。
5. 前で言及したように5.～8.の段階に従ってください。

注: 接続方法がTTNサーバーで変更される場合、装置が網に繋げようとする時毎に同じ接続手続きを使うべきです。

4.4.4. 感知器節点からTTNサーバーへのデータ送信

感知器節点からTTNサーバーへデータを送信するには以下の段階に従うのが便利です。

1. PCへ接続するのに使われるXMEGA-A3BU Xplained基板からのミニUSBケーブルを切断してください。
2. RN2483 LoRa技術Mote基板の電池保持部に2つのAAA電池を挿入し、基板に給電するためにS1スイッチをONにしてください。以降、感知器節点は感知器節点動作で動きます。
3. XMEGA-A3BU Xplained基板のLCDで表示される初期メッセージは”LoRa Sensor Node Deme, V 1.0.3 Code”です。
4. その後、LoRa網へ繋ぐために感知器設定に対して適切な接続方法を選ぶ使用者入力を持ちます。
5. LoRa網を繋ぐ個体設定による認証(ABP)を選ぶためにXMEGA-A3BU Xplained上のSW0釦を押してください。
注: OTTA接続法を選ぶにはSW1釦を押してください。
6. 感知器節点が成功裏に網を繋げた後、LCD画面でABP接続成功メッセージが表示されます。
7. 異なる感知器節点の状態間を誘導するにはSW0とSW1のスイッチを使ってください。
8. 15秒間釦押下活動がない場合、感知器節点は休止動作へ行きます。
9. 感知器設定は光と温度の感知器を走査してTTNサーバーにデータを送信するために周期的に休止動作から起き上がります。周期は使用者構成設定可能なパラメータです。既定により、周期的なデータ送信間隔は1分に設定されます。周期は5分、10分、15分、30分、60分として構成設定することができます。

表4-2.は実演応用ファームウェアで感知器節点動作によって支援される各種状態を示します。

表4-2. 感知器節点動作によって支援される各種状態

状態	説明
上方向メッセージ発行 (Issue up-link message)	確認されたまたは確認されていないのどちらかのメッセージとして光と温度の感知器データをTTNサーバーに送信します。確認されたメッセージについてはTTNサーバーが各メッセージ受信後に肯定応答で返答します。
下方向メッセージ表示 (View down-link message)	存在すれば、下方向メッセージと共に最後に受信した下方向データを表示
感知器データ表示 (Sensor data display)	1秒毎に更新される光と温度の感知器データを表示
メニュー制限時間 (Menu timeout)	15秒のメニュー制限時間を許可または禁止。禁止なら、LoRa感知器節点は休止動作へ行きません。
周期的上方向通信タイミング構成設定 (Periodic up-link timing configuration)	TTNサーバーへの感知器データ用の周期的上方向メッセージ タイミングを構成設定。時間間隔は1,5,10,15,30,60分にすることができます。
データ速度選択(Select data rate)	データ速度は0.1.2.3.4.5.またはADR(適応データ速度)として構成設定することができます。

4.5. 電力消費の結果

ATxmega256A3BU MCUの電力消費データは感知器節点が活動動作だけでなくパワーダウン動作で動作する間も捕らえられます。電力消費測定構成設定は以下から成ります。

- XMEGA-A3BU Xplained
- 電流測定用マルチメータ

表4-3. 動作条件と構成設定される周辺機能

MCU	ATxmega256A3BU
動作電圧	3.3V
動作周波数	48MHz/4=12MHz
CPUクロック構成設定	DFLL 48MHzに校正され、12MHzに前置分周される、32MHz内部発振器
休止動作	パワーダウン
許可する周辺機能	ADC、RTC32、計時器0、UART、USB、事象システム、DMA
ADC構成設定	12MHzシステムクロックで動作、符号付き動作、12ビット分解能、1MHz採取速度、VCC/1.6基準電圧、計時器が事象システム上で起動
ADCチャネル	チャネル0: 温度感知器、チャネル1: 光感知器
RTC32構成設定	外部32kHzクリスタルが供給元。RTCは1分毎に差動、溢れで割り込み
計時器0構成設定	クロック元は12MHzシステムクロック、計時器溢れ割り込みが1ms毎に発生
UART構成設定	非同期動作、ボーレート9600、8データビット、1停止ビット
USB構成設定	48MHz DFLLがクロック元、USB 2.0全速動作、CDCクラス
事象システム構成設定	クロック元は12MHzシステムクロック、事象システムのch-0が計時器0割り込みに使われます。
DMA構成設定	2つのADCチャネルからデータ緩衝部へデータを転送す

表4-3.はATxmega256A3BU MCUの動作条件と感知器節点動作用に構成設定される周辺機能の一覧を示します。

表4-4.は各種休止期間値でのATxmega256A3BU MCUの電力消費値を示します。

表4-4. 各種休止期間でのATxmega256A3BUの電力消費値

状態番号	活動期間 [秒]	活動電流 [mA]	休止期間 [秒]	休止電流 [mA]	平均電流 [μA]
1	4	9.58	60	1.1	599.7
2	4	9.58	300	1.1	127.1
3	4	9.58	600	1.1	64.5
4	4	9.58	900	1.1	43.5
5	4	9.58	1800	1.1	22.3
6	4	9.58	3600	1.1	11.7

活動動作でのRN2483 LoRa技術Moteの電力消費は3.76mAで休止動作でのそれは0.87μAです。

注: ・ この応用ではRN2483 LoRa技術Mote基板でRN2483 LoRa送受信器が単独で許可されます。基板上のLCD表示器、感知器、PIC MCUは感知器節点回路から分離されます。

4.6. プログラムとデータのメモリの必要条件

様々なコンパイル最適化水準に対する応用ファームウェアのプログラムとデータのメモリ必要条件は右で与えられるようです。

表4-5. 様々なコンパイル最適化での応用メモリ必要条件

最適化	プログラムメモリ [バイト]	データメモリ [バイト]
-O0	67558	3309
-O1	34700	3292
-O2	34384	3308
-Os	30604	3308

4.7. 応用の結果

XMEGA AUに基づく感知器節点、Microchip LoRa交換器基板、The Things NetworkサーバーでのLoRaWAN網は安全な双方向LoRa通信を成功裏に実演されました。

無線感知器節点での全ての実験は印度のバンガロールで実施されました。高層建築によって囲まれた高密度市街地では、交換器が建物内に置かれる概ね半径1km内で感知器節点がLoRa交換器と通信されます。

ATxmega256A3BU MCUとRN2483 LoRa送受信器単位部を用いて実現された感知器節点はIoT応用に対して実演されたATxmega256A3BU MCUのADC、事象システム制御器、DMA制御器、計時器、RTC、UART、USB周辺機能の有効利用を持ちます。

感知器節点はATxmega256A3BU MCUとRN2483 LoRa送受信器単位部のより低い電力消費のために活動とパワーダウンの両動作で最適化された電力消費を達成しました。

5. 低電力の考慮

IoT応用に対して、MCUの電力消費は非常に重要です。電力消費は動作電圧、動作周波数、CPU活動期間、休止動作、動作温度などのようないくつかの要素によって多く影響されます。

実用的な応用では通常、CPUがアイドルでどんな活動的な計算も実行していない間、MCUは休止動作に置かれます。これはより大きな範囲に対してMCUの活動期間を最小にします。これにより、MCUの平均電力消費が減り、より長い電池寿命を達成するのに役立ちます。

理論的に、平均電力消費は次式によって計算されます。

$$\text{平均電力消費} = \frac{(\text{活動電流} \times \text{活動期間}) + (\text{休止電流} \times \text{休止期間})}{(\text{活動期間} + \text{休止期間})}$$

ここで、

- ・活動電流は活動期間中にMCUによって消費された電流です。
- ・活動期間はMCUが活動期間である時間です。
- ・休止電流は休止動作でMCUによって消費される電流です。
- ・休止期間はMCUが休止期間である時間です。

5.1. MCU電力消費最適化

MCU電力消費に著しく影響する様々な要素が電力消費を減らすための適切な推奨と考慮と共に下で簡潔に検討されます。

5.1.1. 動作電圧

電力消費はMCUの供給電圧の2乗に比例します。動作電圧での増加はデバイス電力消費を増します。従って、供給電圧は可能な限り低く保つべきです。

可能な限り低い供給電圧を用いることによって電力消費を最小にしてください。

5.1.2. 動作周波数

MCUの動作周波数はその電力消費に影響を及ぼします。MCU動作周波数での増加はデバイス電力消費を増します。また、より低い動作周波数ではMCU活動期間が増し、またその逆もです。

MCU電力消費は異なる周波数を渡る活動期間と活動電流間の二律背反です。

5.1.3. クロック元選択

最適電力消費のために、MCUに対する適切なシステム クロック選択はとても不可欠です。より高いシステム クロックと前置分周を使う代わりに、より低い違うクロック元へ切り替えてください。

例えば、16MHzのシステム クロックを生成するのに、PLLと基準としての2MHz RC発振器を使うことは16MHzへ前置分周する32MHz RC発振器よりも好ましいです。外部クロック元の使用は、特にそれらが既にシステムで利用可能な場合にも良い選択かもしれません。

MCUに対する起き上がり遅延はシステム クロックにどのクロック元が使われるかに依存します。この遅延を減らすための1つの方法はMCUが休止へ行って高速応答クロック元で起き上がるようにクロック元を切り替えることです。

クロック速度を減らすために前置分周だけに頼るよりもむしろクロック元切り替えによって電力消費を最小にしてください。

5.1.4. クロック前置分周

多くの応用は活動動作で費やす時間を最小にするために可能な限り高速なCPU動作を必要とします。しかし、或る応用に対して、CPUは一定量の時間(例えば、直列通信)の間、活動動作またはアイドル動作で待たなければならない、これはシステム クロック速度を落とす方がより良いです。クロック前置分周を用いてCPUと周辺機能の適切なクロック周波数を構成設定するのがより良いことです。いくつかの周辺機能で前置分周が内部的に行われる場合、クロック分配連鎖で可能な限り早く(前で)より大きな共通係数で前置分周することによって電力を浪費されないようにすることができます。

注: 前置分周はCPUクロックにも影響を及ぼすため、計算がより長くなるので活動動作でのこの共通前置分周を実行することは常に望まれないかもしれません。

特に活動動作またはアイドル動作で待つ時に前置分周器を効果的に使うことによって電力消費を最小にしてください。

5.1.5. 活動動作の動作

活動動作、即ち、休止動作が使われない時では、電力消費がシステム クロック周波数に比例します。これは休止動作が使われない場合、デバイスは電力消費を最小にするために可能な最低システム クロック周波数で走行すべきです。

休止動作が使われない場合に可能な限り低いクロック周波数に保つことによって電力消費を最小にしてください。

5.1.6. 休止動作

MCUが継続的に活動なら、その電力消費は増します。殆どの応用では電力消費を最小にすることが望まれますが、システムクロック周波数を減らすことは違います。これは主にシステムの高速処理と素早い応答を保証するためです。このような応用に於いて、AVR XMEGAデバイスの休止動作の使用は処理するものがない時にデバイスを低電力状態に保つことです。主な原則は可能な限り速く走行して可能な限り多く休止することです。可能な限り速い走行は、例えば、活動動作で許可されている不揮発メモリのため、(即ち、クロック周波数と無関係に)静的電力消費の影響を減らします。

最も一般的に利用可能な休止動作は、アイドル、パワーダウン、パワーセーブ、スタンバイ、拡張スタンバイです。各休止動作は異なる周辺機能の組を利用します。これらの休止動作の中で、この動作が良好な電力削減に帰着するほぼ全ての周辺機能を停止するため、パワーダウン動作が最良の休止動作です。応用の電力必要条件に基づき、デバイスの活動と休止の持続時間を構成設定することができます。

定義されたより短い持続時間に対する活動動作とより長い持続時間に対する休止動作にデバイスを保ってください。

5.1.7. 未使用周辺機能

MCUの活動期間での未使用周辺機能の許可はその電力消費を増します。応用ではそのクロック信号を禁止することによって未使用周辺機能を停止することが推奨されます。これは周辺機能クロック領域から個別周辺機能を切断する、デバイスで利用可能な適切な電力削減レジスタ(PRR)を用いることによって可能です。パワーセーブとパワーダウンの動作では周辺機能クロック領域が禁止されるため、PRRの状態に関わらず(周辺機能)単位部が停止されます。

電力消費を減らすためにMCUの活動期間で未使用周辺機能を禁止してください。

5.1.8. 未使用汎用入出力(GPIO)

未使用汎用入出力ピンは定義されたレベルを持つことを保証することが推奨されます。深い休止動作でデジタル入力の殆どが禁止されるとは言え、電力消費を減らすために浮き入力は活動動作、パワーセーブ動作、アイドル動作のような他の動作で避けられるべきです。

電力消費を最小にするよう、定義されたレベルを保証して減らされる電力消費のために未使用汎用入出力ピンを許可された内部プルアップ付き入力として構成設定してください。

5.1.9. アナログ入出力

入出力ピンがアナログ供給元に接続されてアナログ動作に使われる場合、それらのピンからのデジタル入力は必要とされません。電力消費を減らすために個別ポートに対するピン制御(PINnCTRL)レジスタの使用によってデジタル入力緩衝部を禁止してください。

アナログ供給元に接続されるピンのデジタル入力緩衝部を禁止してください。

5.1.10. 低電圧検出器(BOD)

低電圧検出器(BOD)の目的は電源電圧を積極的に監視することとMCUが低すぎる電圧で動かないことを保証することです。BODはBODLEVELヒューズによって構成設定されます。BODは不定の電圧レベルを監視するために活動/アイドルと休止動作に対して独立して構成設定することができます。これは活動動作とアイドル動作でだけ許可されることをBODに許します。AVR XMEGAデバイスでは電力を減らすためにパワーダウン休止動作でBODを禁止することが推奨されます。

ソフトウェアでBODが禁止されると、休止動作移行後直ちにOFFにされ、供給電圧を監視するために起き上がりで自動的にONにされます。

電力を浪費しないために応用ソフトウェアを通して休止動作でBODを禁止してください。

5.1.11. RTCクロック元

RTCは一般的に周期的な間隔で休止からデバイスを起こすのに使われます。RTCとそのクロックはアイドル、パワーセーブ、拡張スタンバイ休止動作で活性です。故に、RTCはこれらの休止動作に対する起こし元として構成設定することができます。

XMEGA系統のデバイスについては、RTCをクロック駆動するのに次の3つの異なる発振器を使うことができます。

- ・ 外部32kHzクリスタル
- ・ 内部32kHz RC発振器
- ・ 内部32kHz超低電力(ULP)発振器

これら全ての場合で、前置分周された1kHzクロック信号が利用可能で、最適化された電力消費のために使われるべきです。

外部32kHzクリスタル用発振器について、特別な低電力動作(X32KLPM)も利用可能です。X32KLPM許可で外部32kHzクリスタルを使うことが推奨されます。これはULPよりも低い電力消費にも拘らず内部RC発振器より高い精度を与えます。

電池代替単位部と32ビットRTCを持つAVR XMEGA系統については32kHzクリスタル用発振器だけがクロック元として使われるかもしれませんが。これらのデバイスでは休止に関わらずRTCが走行のままにされます。

低電力動作の外部クリスタルでの1kHzでRTCをクロック駆動することによって電力消費を最小にしてください。

5.1.12. ウォッチドッグ

ウォッチドッグは基本的に独立したクロック元を持つ計時器です。許可されたなら、それは休止で電力消費の一因になります。ウォッチドッグは1kHzに前置分周された内部32kHz超低電力(ULP)発振器だけによってクロック駆動されます。

電力消費を最小にするため、ウォッチドッグを禁止してください。

5.1.13. JTAGインターフェースとチップ上デバッグ

JTAGインターフェースはプログラミングとデバッグに使われますが、最終製品の動作中に全く機能を持ちません。チップ上デバッグ(OCD)機能が許可される場合に休止中にクロック駆動されて活動します。OCDとJTAGインターフェースは従って必要とされない場合に禁止されるべきです。

OCDはヒューズで禁止することができ、一方でJTAGインターフェースはヒューズとソフトウェアの両方で禁止することができます。ソフトウェアでのJTAG禁止はJTAGインターフェースがRESETで再許可されないため、MCUを再書き込みできることを保証します。

代わりに、プログラミングとデバッグにPDIインターフェースを使うことができます。この場合、JTAGインターフェースは全てで不要かもしれませんが、ヒューズによって禁止されるかもしれません。PDIインターフェースは全ての休止動作でも動きます。

電力消費を最小にするため、OCDとJTAGインターフェースを禁止してください。

5.1.14. 起き上がり遅延

MCUが(2つのスタンバイ動作の例外付きで)アイドルよりも深い休止動作から起き上がる時にシステムクロック元はCPUが動作を開始する前に安定でなければなりません。これは選んだクロック元に応じて短い遅延をもたらします。内部RC発振器または外部クロックが使われる場合、始動遅延は6周期です。これはRC発振器始動時間に加えてです。XTAL発振器が使われる場合、始動遅延は構成設定可能です。周波数安定性が望まれる場合、各々、セラミック振動子に対して1,000周期、クリスタル発振子に対して16,000周期の始動遅延が推奨されます。これは振動子/発振子と負荷容量に依存する発振器始動時間に加えてです。加えて、起き上がり後に割り込み処理ルーチン(ISR)が実行を開始する前に13周期の最小遅延があります。これは例えば、プログラムカウンタがスタックに押し込まれてISRに飛ぶためです。

始動遅延の間、電力消費はアイドルでの電力消費に近く、故に”無効な”電力を表します。従って、可能なら、可能な限り稀にしか起き上がらず、むしろデバイスが起き上がる毎に”もっと(処理を)行う”ことが推奨されます。

起き上がり遅延を最小にして電力を浪費しないためにRC発振器または外部クロック元を使って可能な限り稀にしか起き上がらないでください。

5.1.15. 仮想ポートレジスタ

活動動作で費やす時間を最小にするため、仮想ポートレジスタを使うことができます。これは4つまでの入出力ポートに対して、IN,OUTのようなI/Oメモリ指定命令での単一周期アクセス、DIR,IN,OUT,INTFLAGSのレジスタに対するビット操作を許します。

電力消費を最小にするために入出力ポートアクセスに仮想ポートレジスタを使ってしてください。

従うべき低電力消費技術のもっと詳細な情報については「AVR1010:Atmel AVR XMEGAデバイスの電力消費最小化」応用記述を参照してください。

5.2. コード最適化

電力消費を減らすため、Atmel Studioに基づくファームウェアを速度に対して最適化してください。Atmel Studio 7.0 IDEは様々な水準の速度最適化を支援します。最高水準の速度最適化は最適化水準-O3で可能です。

AVR XMEGAデバイスに対して利用可能なGCCとIAR™コンパイラ ツールチェーンの中で、IARコンパイラはGCCに比べて最良のコード最適化を提供します。故に、電力が重要な応用に対して、IARコンパイラ使用がより望まれる任意選択です。

- ・ 速度に対して最高の最適化水準(-O3)を選んでください。
- ・ 重要な電力必要条件に対してはIARコンパイラ ツールチェーンを使ってください。

6. 結び

この応用記述はAVR XMEGA AU MCUの重要な機能、理想的なIoT用応用を説明します。他の標準的な周辺機能と共にADC、事象システム、DMA、暗号エンジンの組み合わせとXMEGA AU MCUのpicoPower技術は最低のシステム電力消費と安全な通信を提供します。XMEGA AU MCUのこれらの重要機能はいくつかの電池駆動IoT応用に対してMCUの選択(要素)にします。

Microchip XMEGA AU MCUとRN LoRa送受信器単位部はIoT、機器間(M2M:Machine-to-Machine)応用に対して最適です。健全性監視、賢い電力計、賢い都市、市街光制御、対象物/環境監視などのような応用に対しても適切です。

7. 参考

1. LoRaとLoRaWANの技術的概要 - https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ealcd969417493c74e4a13c55685.pdf
2. LoRaWAN安全性 - https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_cc44304714c14f80a6ce50fc9f9cee2a.pdf
3. Microchip RN2483 LoRa技術送受信器単位部 - <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346C.pdf>
4. Microchip RN2483 LoRa技術Mote - <http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=DM164138>
5. Microchip LoRa技術評価キット - <http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=DV164140-1>
6. AVR1010:Atmel AVR XMEGAデバイスの電力消費最小化 - <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/doc8267.pdf>

8. 改訂履歴

資料改訂	日付	注釈
A	2017年10月	初版資料公開

Microchipウェブ サイト

Microchipは<http://www.microchip.com/>で当社のウェブ サイト経由でのオンライン支援を提供します。このウェブ サイトはお客様がファイルや情報を容易に利用可能にする手段として使われます。お気に入りのインターネット ブラウザを用いてアクセスすることができ、ウェブ サイトは以下の情報を含みます。

- ・ **製品支援** – データシートと障害情報、応用記述と試供プログラム、設計資源、使用者の手引きとハードウェア支援資料、最新ソフトウェア配布と保管されたソフトウェア
- ・ **全般的な技術支援** – 良くある質問(FAQ)、技術支援要求、オンライン検討グループ、Microchip相談役プログラム員一覧
- ・ **Microshipの事業** – 製品選択器と注文の手引き、最新Microchip報道発表、セミナーとイベントの一覧、Microchip営業所の一覧、代理店と代表する工場

お客様への変更通知サービス

Microchipのお客様通知サービスはMicrochip製品を最新に保つのに役立ちます。加入者は指定した製品系統や興味のある開発ツールに関連する変更、更新、改訂、障害情報がある場合に必ず電子メール通知を受け取ります。

登録するには<http://www.microchip.com/>でMicrochipのウェブ サイトをアクセスしてください。”Support”下で”Customer Change Notification”をクリックして登録指示に従ってください。

お客様支援

Microchip製品の使用者は以下のいくつかのチャネルを通して支援を受け取ることができます。

- ・ 代理店または販売会社
- ・ 最寄りの営業所
- ・ 現場応用技術者(FAE:Field Application Engineer)
- ・ 技術支援

お客様は支援に関してこれらの代理店、販売会社、または現場応用技術者(FAE)に連絡を取るべきです。最寄りの営業所もお客様の手助けに利用できます。営業所と位置の一覧はこの資料の後ろに含まれます。

技術支援は<http://www.microchip.com/support>でのウェブ サイトを通して利用できます。

Microchipデバイス コード保護機能

Microchipデバイスでの以下のコード保護機能の詳細に注意してください。

- ・ Microchip製品はそれら特定のMicrochipデータシートに含まれる仕様に合致します。
- ・ Microchipは意図した方法と通常条件下で使われる時に、その製品系統が今日の市場でその種類の最も安全な系統の1つであると考えます。
- ・ コード保護機能を破るのに使われる不正でおそらく違法な方法があります。当社の知る限りこれらの方法の全てはMicrochipのデータシートに含まれた動作仕様外の方法でMicrochip製品を使うことが必要です。おそらく、それを行う人は知的財産の窃盗に関与しています。
- ・ Microchipはそれらのコードの完全性について心配されているお客様と共に働きたいと思います。
- ・ Microchipや他のどの半導体製造業者もそれらのコードの安全を保証することはできません。コード保護は当社が製品を”破ることができない”として保証すると言うことを意味しません。

コード保護は常に進化しています。Microchipは当社製品のコード保護機能を継続的に改善することを約束します。Microchipのコード保護機能を破る試みはデジタル ミレニアム著作権法に違反するかもしれません。そのような行為があなたのソフトウェアや他の著作物に不正なアクセスを許す場合、その法律下の救済のために訴権を持つかもしれません。

法的通知

デバイス応用などに関してこの刊行物に含まれる情報は皆さまの便宜のためにだけ提供され、更新によって取り換えられるかもしれません。皆さまの応用が皆さまの仕様に合致するのを保証するのは皆さまの責任です。Microchipはその条件、品質、性能、商品性、目的適合性を含め、明示的にも黙示的にもその情報に関連して書面または表記された書面または黙示の如何なる表明や保証もしません。Microchipはこの情報とそれの使用から生じる全責任を否認します。生命維持や安全応用でのMicrochipデバイスの使用は完全に購入者の危険性で、購入者はそのような使用に起因する全ての損害、請求、訴訟、費用からMicrochipを擁護し、補償し、免責にすることに同意します。他に言及されない限り、Microchipのどの知的財産権下でも暗黙的または違う方法で許認可は譲渡されません。

商標

Microchipの名前とロゴ、Microchipロゴ、AnyRate、AVR、AVRロゴ、AVR Freaks、BeaconThings、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、Heldo、JukeBlox、KeeLoq、KeeLoqロゴ、Kleer、LANCheck、LINK MD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、MOST、MOSTロゴ、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32ロゴ、Prochip Designer、QTouch、RightTouch、SAM-BA、SpyNIC、SST、SSTロゴ、SuperFlash、tinyAVR、UNI/O、XMEGAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、mTouch、Precision Edge、Quiet-Wireは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの登録商標です。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BodyCom、chipKIT、chipKITロゴ、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、EtherGREEN、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、KleerNet、KleerNetロゴ、Mindi、MiWi、motorBench、MPASM、MPF、MPLAB Certifiedロゴ、MPLAB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PureSilicon、QMatrix、RightTouchロゴ、REAL ICE、Ripple Blocker、SAM-ICE、Serial Quad I/O、SMART-I.S.、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、View Sense、WiperLock、Wireless DNA、ZENAは米国と他の国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの商標です。

SQTPは米国に於けるMicrochip Technology Incorporatedの役務標章です。

Silicon Storage Technologyは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の登録商標です。

GestICは他の国に於けるMicrochip Technology Inc.の子会社であるMicrochip Technology Germany II GmbH & Co. KGの登録商標です。

ここで言及した以外の全ての商標はそれら各々の会社の所有物です。

© 2017年、Microchip Technology Incorporated、米国印刷、不許複製

DNVによって認証された品質管理システム

ISO/TS 16949

Microchipはその世界的な本社、アリゾナ州のチャンドラーとテンペ、オレゴン州グラシャムの設計とウェハー製造設備とカリフォルニアとインドの設計センターに対してISO/TS-16949:2009認証を取得しました。当社の品質システムの処理と手続きはPIC[®] MCUとdsPIC[®] DSC、KEELOQ符号飛び回りデバイス、直列EEPROM、マイクロ周辺機能、不揮発性メモリ、アナログ製品用です。加えて、開発システムの設計と製造のためのMicrochipの品質システムはISO 9001:2000認証取得です。

日本語© HERO 2021.

本応用記述はMicrochipのAN2559応用記述(DS00002559A-2017年10月)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には()内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。

世界的な販売とサービス

米国	亜細亜/太平洋	亜細亜/太平洋	欧州
本社 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277 技術支援: http://www.microchip.com/support ウェブアドレス: www.microchip.com アトランタ Duluth, GA Tel: 678-957-9614 Fax: 678-957-1455 オースチン TX Tel: 512-257-3370 ボストン Westborough, MA Tel: 774-760-0087 Fax: 774-760-0088 シカゴ Itasca, IL Tel: 630-285-0071 Fax: 630-285-0075 ダラス Addison, TX Tel: 972-818-7423 Fax: 972-818-2924 デトロイト Novi, MI Tel: 248-848-4000 ヒューストン TX Tel: 281-894-5983 インディアナポリス Noblesville, IN Tel: 317-773-8323 Fax: 317-773-5453 Tel: 317-536-2380 ロサンゼルス Mission Viejo, CA Tel: 949-462-9523 Fax: 949-462-9608 Tel: 951-273-7800 ローリー NC Tel: 919-844-7510 ニューヨーク NY Tel: 631-435-6000 サンホセ CA Tel: 408-735-9110 Tel: 408-436-4270 カナダ - トロント Tel: 905-695-1980 Fax: 905-695-2078	亜細亜太平洋支社 Suites 3707-14, 37th Floor Tower 6, The Gateway Harbour City, Kowloon 香港 Tel: 852-2943-5100 Fax: 852-2401-3431 オーストラリア - シドニー Tel: 61-2-9868-6733 Fax: 61-2-9868-6755 中国 - 北京 Tel: 86-10-8569-7000 Fax: 86-10-8528-2104 中国 - 成都 Tel: 86-28-8665-5511 Fax: 86-28-8665-7889 中国 - 重慶 Tel: 86-23-8980-9588 Fax: 86-23-8980-9500 中国 - 東莞 Tel: 86-769-8702-9880 中国 - 広州 Tel: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 Tel: 86-571-8792-8115 Fax: 86-571-8792-8116 中国 - 香港特別行政区 Tel: 852-2943-5100 Fax: 852-2401-3431 中国 - 南京 Tel: 86-25-8473-2460 Fax: 86-25-8473-2470 中国 - 青島 Tel: 86-532-8502-7355 Fax: 86-532-8502-7205 中国 - 上海 Tel: 86-21-3326-8000 Fax: 86-21-3326-8021 中国 - 瀋陽 Tel: 86-24-2334-2829 Fax: 86-24-2334-2393 中国 - 深圳 Tel: 86-755-8864-2200 Fax: 86-755-8203-1760 中国 - 武漢 Tel: 86-27-5980-5300 Fax: 86-27-5980-5118 中国 - 西安 Tel: 86-29-8833-7252 Fax: 86-29-8833-7256	中国 - 廈門 Tel: 86-592-2388138 Fax: 86-592-2388130 中国 - 珠海 Tel: 86-756-3210040 Fax: 86-756-3210049 インド - ハンガロール Tel: 91-80-3090-4444 Fax: 91-80-3090-4123 インド - ニューデリー Tel: 91-11-4160-8631 Fax: 91-11-4160-8632 インド - プネー Tel: 91-20-3019-1500 日本 - 大阪 Tel: 81-6-6152-7160 Fax: 81-6-6152-9310 日本 - 東京 Tel: 81-3-6880-3770 Fax: 81-3-6880-3771 韓国 - 大邱 Tel: 82-53-744-4301 Fax: 82-53-744-4302 韓国 - ソウル Tel: 82-2-554-7200 Fax: 82-2-558-5932 or 82-2-558-5934 マレーシア - クアラルンプール Tel: 60-3-6201-9857 Fax: 60-3-6201-9859 マレーシア - ペナン Tel: 60-4-227-8870 Fax: 60-4-227-4068 フィリピン - マニラ Tel: 63-2-634-9065 Fax: 63-2-634-9069 シンガポール Tel: 65-6334-8870 Fax: 65-6334-8850 台湾 - 新竹 Tel: 886-3-5778-366 Fax: 886-3-5770-955 台湾 - 高雄 Tel: 886-7-213-7830 台湾 - 台北 Tel: 886-2-2508-8600 Fax: 886-2-2508-0102 タイ - バンコク Tel: 66-2-694-1351 Fax: 66-2-694-1350	オーストリア - ウェルス Tel: 43-7242-2244-39 Fax: 43-7242-2244-393 デンマーク - コペンハーゲン Tel: 45-4450-2828 Fax: 45-4485-2829 フィンランド - エスポー Tel: 358-9-4520-820 フランス - パリ Tel: 33-1-69-53-63-20 Fax: 33-1-69-30-90-79 フランス - サンクルー Tel: 33-1-30-60-70-00 ドイツ - ガルピング Tel: 49-8931-9700 ドイツ - ハーネ Tel: 49-2129-3766400 ドイツ - ハイムブロン Tel: 49-7131-67-3636 ドイツ - カールスルーエ Tel: 49-721-625370 ドイツ - ミュンヘン Tel: 49-89-627-144-0 Fax: 49-89-627-144-44 ドイツ - ローゼンハイム Tel: 49-8031-354-560 イスラエル - ラーナナ Tel: 972-9-744-7705 イタリア - ミラノ Tel: 39-0331-742611 Fax: 39-0331-466781 イタリア - ハットバ Tel: 39-049-7625286 オランダ - デルフト Tel: 31-416-690399 Fax: 31-416-690340 ノルウェー - トロンハイム Tel: 47-7289-7561 ポーランド - ワルシャワ Tel: 48-22-3325737 ルーマニア - ブカレスト Tel: 40-21-407-87-50 スペイン - マドリード Tel: 34-91-708-08-90 Fax: 34-91-708-08-91 スウェーデン - イェテボリ Tel: 46-31-704-60-40 スウェーデン - ストックホルム Tel: 46-8-5090-4654 イギリス - ウォーキンガム Tel: 44-118-921-5800 Fax: 44-118-921-5820