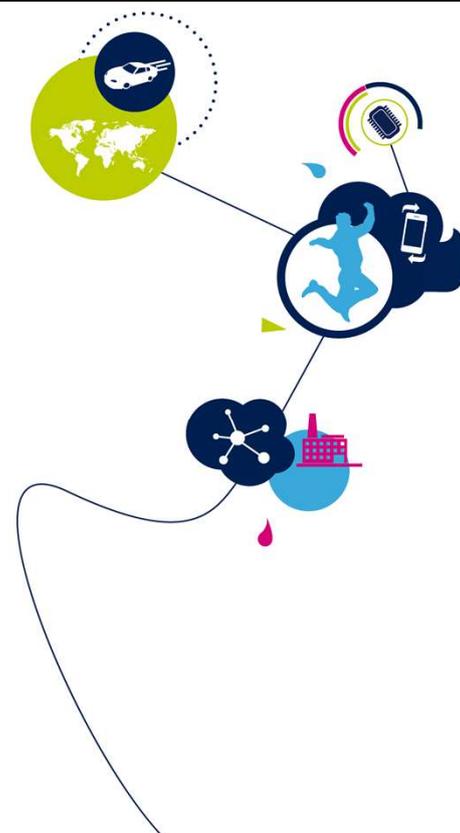


STM32G4 - SPI

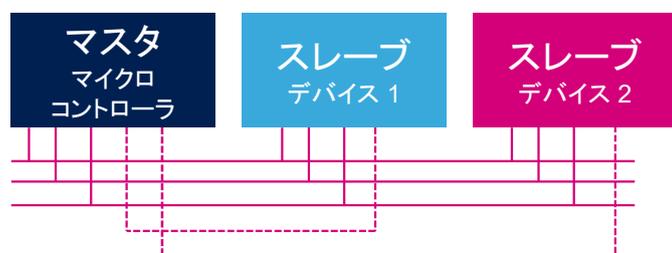
シリアル・ペリフェラル・インタフェース

1.0 版



こんにちは。STM32シリアルペリフェラルインタフェースのプレゼンテーションへようこそ。

- シンプルなシリアル通信インタフェース
 - 詳細な設定が可能
 - 標準同期プロトコルをサポート



アプリケーション側の利点

- インタフェースに必要なピンは数本だけ
- 外部コンポーネント／デバイスを SPI インタフェースにシンプルに統合



内蔵されている標準ペリフェラルであるインタフェース SPI は、シンプルな通信インタフェースを提供して、マイクロコントローラと外部デバイスの通信を可能にします。このインタフェースは詳細な設定が可能であり、多くの標準プロトコルをサポートします。アプリケーションは、数本のピンしか必要としない、コンポーネントへのシンプルな直接接続を利用できます。SPI は詳細な設定が可能のため、多くのデバイスを既存のプロジェクトに容易に対応させることができます。

- 動作モード
 - マスタまたはスレーブ (マルチマスタ & マルチスレーブ・サポート)
 - 全二重、シンプレックス、または半二重
 - モトローラおよび TI 標準をサポート
- 最大 $f_{PCLK/2}$ の動作
 - 少なくとも二線インタフェース (スレーブ選択管理オプション)
 - 設定可能なデータおよびクロック・フォーマット
 - プロトコル・レベルで追加のサポート (Tx および Rx FIFO、DMA、CRC)
 - 幅広いイベント・フラグと割込み機能



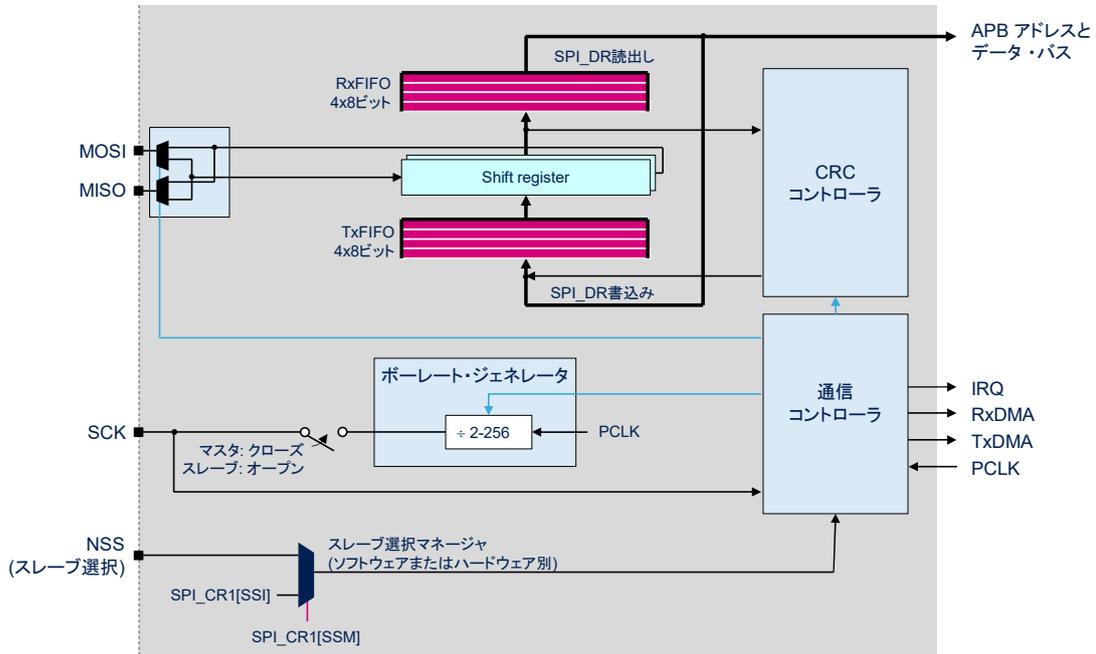
STM32 SPI は、さまざまな動作モードを備え、このプレゼンテーションで詳しく説明します。

通信速度は内部バス周波数の半分を超えることはできず、単方向でクロック信号によって同期されるシリアルデータフローを提供するには、少なくとも二線が必要です。

オプションのハードウェアスレーブ選択制御信号を追加できます。データサイズと送信シフトオーダーを設定可能であり、クロック信号のパリティと位相も設定可能です。

プロトコルレベルで、ユーザは特定のデータバッファを使用でき、オプションの自動巡回冗長検査 (CRC) 計算と、DMA コントローラ経由の転送を使用できます。

割込み要求を生成できる幅広い SPI イベントがあります。



単純化した SPI ブロック図は、基本的な制御メカニズムと機能を示しています。SPI ペリフェラルに関連付けられた 4 つの I/O 信号があります。データはすべて、特定のインタフェースを介して受信および送信バッファを通過します。

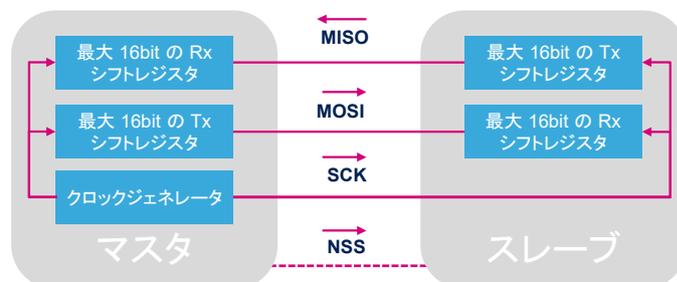
データは、DMA 機能を備えた 2 つの 32 ビット組み込み Rx および Tx の FIFO に一時的に格納されます。

スレーブ選択信号は、マスタとスレーブの両方のハードウェアまたはソフトウェアによって管理され、マスタ/スレーブ操作の動的な変更を可能にします。

SPI コントローラは、信頼性の高い通信のためのハードウェア巡回冗長検査 (CRC) 機能をサポートします。CRC 値は、送信モードで最後のバイトとして送信することができ、最後に受信されたバイトで自動 CRC エラーチェックが行われます。

さまざまなマスター-スレーブ相互接続をサポート

- マスタは常にクロックを供給し、すべてのトラフィックを制御(通信のスレーブを選択)
- データは両方向で並行して交換可能
- 全二重モード(双方向)では、マスタとスレーブの両方が同時にデータを送受信

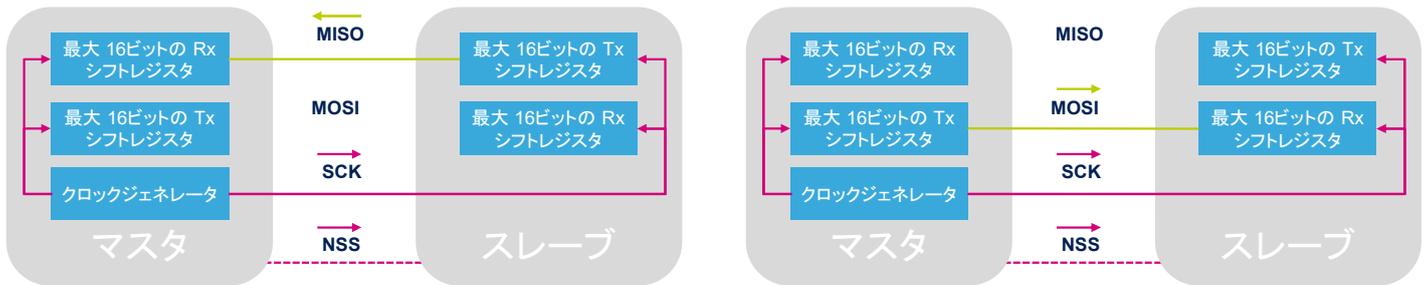


life.augmented

SPI マスタは、常にバスのトラフィックを制御し、SCK ラインを通じて専用スレーブにクロック信号を供給します。マスタはオプションのスレーブ選択または NSS 信号を通じて、通信先のスレーブを選択できます。専用のシフトレジスタに格納されたデータは、MOSI (Master Output, Slave Input) および MISO (Master Input, Slave Output) データラインを通じてマスタとスレーブ間で同期して交換できます。全二重モードでは、両方のデータラインが使用され、同期データは同時に両方向に流れます。

さまざまなマスター-スレーブ相互接続をサポート

- シンプレックス・モード(単方向)では、1つのノードがトランスミッタのとき、もう1つはレシーバ



シンプレックスモードでは、1つのノードがデータを送信するとき、もう1つはデータを受信します。

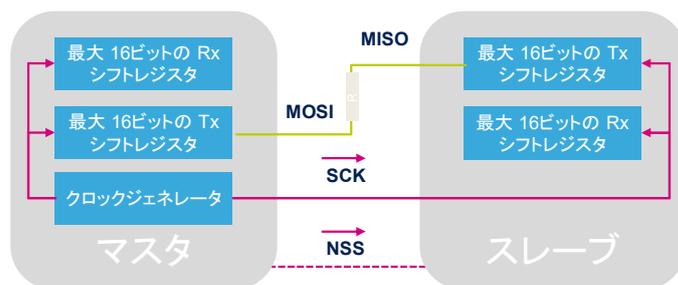
データは一方方向にのみ流れます。

通信方向に応じて、1つのデータラインのみが使用されます。

使用されていないSPIピンは、他の目的に使用できます。

さまざまなマスター-スレーブ相互接続をサポート

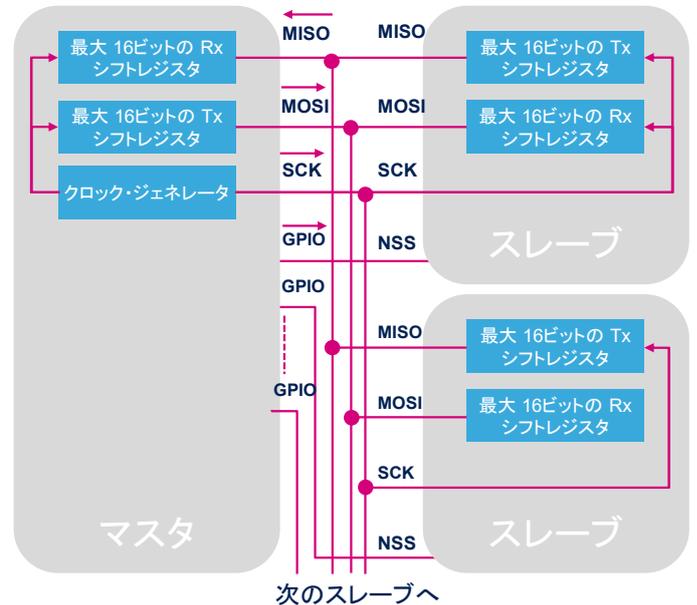
- 半二重モード(準双方向)では、マスターとスレーブの両方がデータの送信と受信を同時に交互に実行
 - ノードは単一の共通データ・ラインを共有



半二重モードは前の 2 つのモードを統合したものであり、データ交換用の 1 つのラインを共有し、データは一度に 1 つの方向に流れます。このモードでは、マスター MOSI ピンとスレーブ MISO ピンとの間の交差接続があります。マスターとスレーブは、共通のデータラインがあるとき、トランスミッタの役割とレシーバの役割を同時に交代する必要があります。半二重データラインには、シリアル抵抗器を追加するのが一般的です。マスターノードとスレーブノードは通常、同期されないため、一時的な短絡接続の可能性があり、これを防止するためです。

マルチスレーブ・ネット・トポロジのサポート

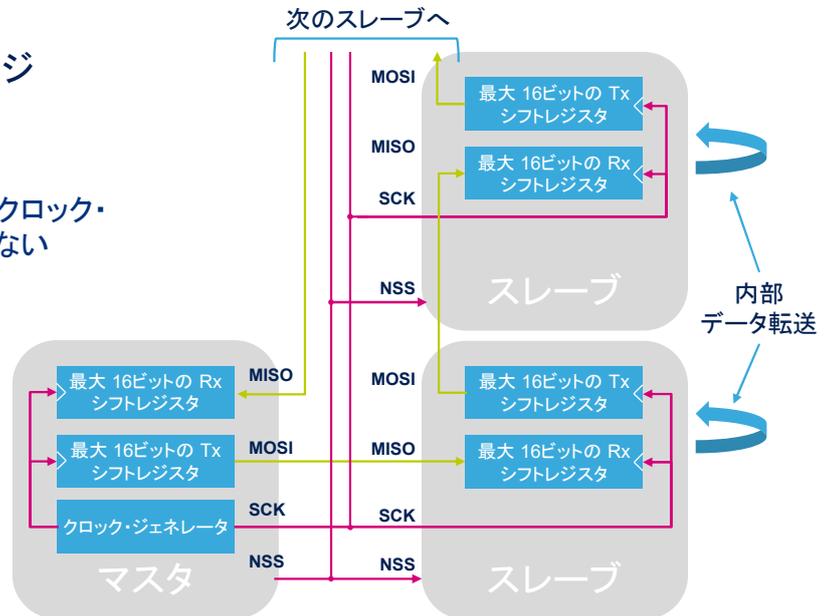
- マルチスレーブ: スタートポロジ
 - マスタはデータの書き込み／読取り時に1つのスレーブノードを選択
 - 個別のスレーブ選択信号 (GPIOピンでシミュレート) が必要
 - スレーブノードは異なるクロックおよびデータ・フォーマットを持つことが可能



SPI ネットワークが複数のスレーブを含むときには、一般にスタートポロジが使用されます。マスタは一度に1つのスレーブと通信します。このトポロジでは、マスタからのスレーブ選択信号を各スレーブノードに提供する必要があるため、マスタは専用のGPIOピンを介して通信するスレーブを選択できます。複数のスレーブノードが共通の設定を持っていない場合でも、個別のスレーブ選択信号 (NSS) により、SPI データおよびクロックフォーマットはスレーブごとに適応できます。

マルチスレーブ・ネット・トポロジのサポート

- マルチスレーブ: サークュラ・トポロジ (デイジー・チェーン)
 - データはすべてのノードを循環
 - すべてのノードが共通のデータおよびクロック・フォーマットをサポートしなければならない

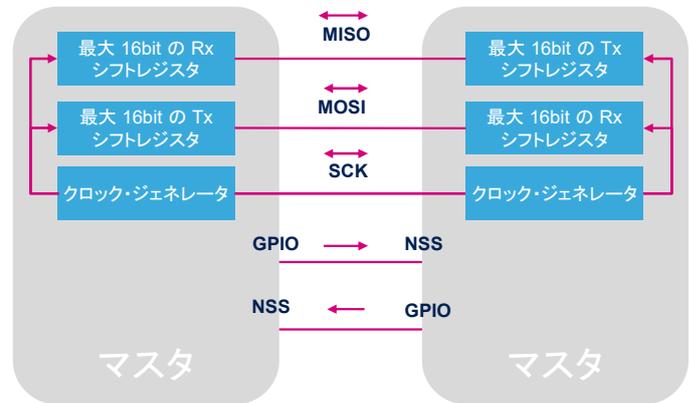


もう1つのマルチスレーブ構成は、サーキュラトポロジです。ここでは、すべてのノードの入出力が、閉じたシリアルチェーンで接続されます。通信が同時に発生すると、すべてのノードについて共通のスレーブ選択信号が使用されます。すべてのノードが同じデータおよびクロックフォーマット構成をサポートする必要があります。マイクロコントローラ SPI ノードは一般に個別の内部送信および受信シフトレジスタを使用するため、それらの間で転送されるデータはソフトウェアによってサーキュラモードで処理されなければなりません。

マスタノードは、内部データ転送を正確にペース設定して、他の外部データ転送と同期し続ける必要があります。

マルチマスタ・トポロジのサポート

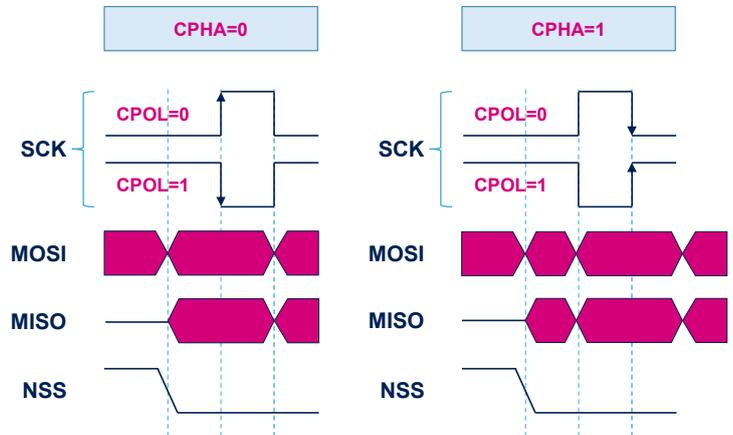
- マルチマスタ: マスタ機能を持つ 2つのノード
 - ノードはデフォルトではスレーブ・モード
 - ノードは自身をアクティブ・マスタに切り替えて、バスの制御を取り、通信セッションを開始
 - スレーブ選択用のピンは、潜在的なバス競合を検出するための入力として使用
 - マスタ・ノードはスレーブ・モードに戻って、通信セッションを終了



SPI ネットワークは、マルチマスタ環境で動作できます。このモードは、2つのマスタノードを排他的に接続するために使用されます。いずれかのノードがアクティブでないときには、デフォルトではスレーブモードになります。1つのノードがバスの制御を取りたいときには、自身をマスタモードに切り替えて、GPIOピンを介して、もう1つのノードにスレーブ選択信号をアサートします。両方のスレーブ選択NSSピンは、ノード間の潜在的なバス衝突を検出するためのハードウェア入力として機能します。SPIバスを制御できるのは一度に1つのノードだけだからです。セッションが完了すると、アクティブノードのマスタはスレーブ選択信号を解放して、パッシブスレーブモードに戻り、次のセッション開始を待ちます。

完全にプログラム可能な柔軟なフォーマット

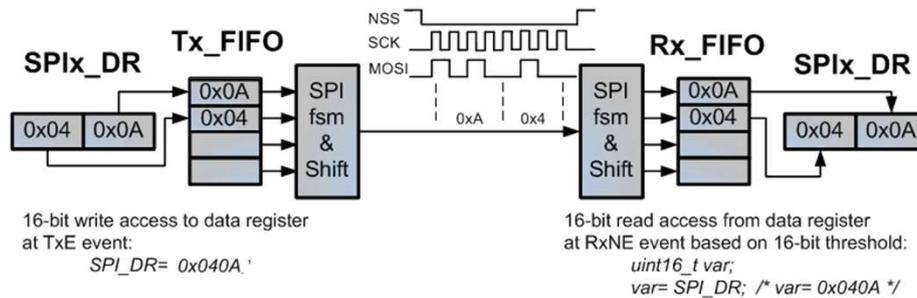
- データフレームのサイズ
 - 4~最大16bit
- ビットのシフトオーダ
 - MSBまたはLSBファースト
- クロック設定(モード0~3)
 - アイドル時に低または高極性
 - 奇数または偶数エッジでサンプリング



データフォーマットのセットアップに使用されるコントロールがいくつかあります。ユーザはデータフレームのサイズとシフトレジスタの送信順を定義できます。クロックは、モトローラ SPI 仕様で定義された 4 つの基本構成の 1 つに設定できます。2 つのビットの組み合わせによって、クロック信号の極性と位相を制御します。位相制御ビットがクリアされると、データビットは奇数クロックエッジでサンプリングされ、偶数クロックエッジで次のビットからデータラインへのシフトが同期されます。これは、位相制御ビットがセットされたときと反対です。クロック極性ビットは、クロック信号のアイドル状態を定義し、いずれのクロックエッジがデータのサンプリングまたはシフトに使用されるかを決めます。

高度なLow-Demand制御

- パッキング・モード
 - 複数のデータ・パターンによる FIFOレジスタのアクセス
 - 設定可能なFIFO閾値レベル
 - DMAアクセス
 - イベントと必要なサービスの数が軽減される
 - システム負荷が軽減される

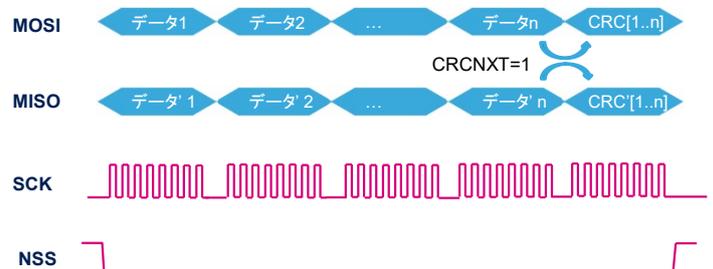


通信速度が高速で、データフレームが短いときには、クロック信号が連続的になり、全二重モードが使用されるときに正しいデータフローを確保することが難しいタスクになることがあります。データオーバーランまたはアンダーラン条件を防止するには、スレーブノードはマスタによって適切に送信されたすべてのトランザクションに適切に対応する必要があります。データフレームサイズが1バイトに収まるときには、パッキングモードを使用できます。その場合、複数のデータパターンをFIFOレジスタへの1回のアクセスで読み書きできます。FIFO閾値イベントが適切に設定されていれば、対応しなければならないイベント数が減り、より適切にデータフローを制御できます。DMAコントローラも使用されるときには、システムへの全体的負荷が大幅に軽減されます。この図は、専用のFIFOレジスタへの1回の16bitアクセスによって、2つの短い4bitデータフレームを読み書きできることを示しています。読取りまたは書込みデータアクセスには1つのサービスイベントが必要なだけです。

拡張されたDMAおよびCRC管理

• DMAコントローラが自動的に処理

- データ・トランザクション・イベントの正確な数
- トランザクションの終了処理
 - CRCコントロール
 - FIFO閾値コントロール



• 柔軟なCRCコントロール

- 受信フローと送信フローに個別の計算器
- 各トランザクションの終了時にCRCパターンが送信
 - トランスミッタはCRC結果をデータシフトレジスタに直接挿入
 - レシーバはCRCをRx FIFOに格納して、値を内部計算と比較
- プログラム可能なCRC多項式(奇数値のみ)とCRC長(8または16bitのCRCフレーム)

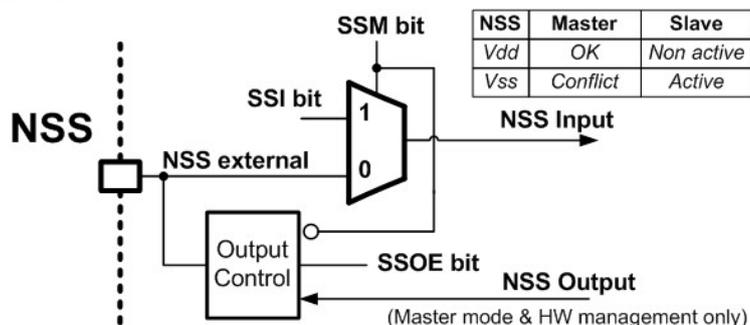


プロトコルレベルの通信中、DMAコントローラを使用してデータフローイベント、CRC計算、およびFIFO閾値の更新を自動的に処理できます。閾値制御の場合、フレーム数がパケットサイズと揃っていないとき、最後の奇数データフレームはパケットモードで正しく適用されます。

CRCが有効な場合、トランスミッタとレシーバに個別のCRC計算器が使用されます。CRC計算結果は、DMAコントローラによって、またはソフトウェア制御によって、各転送の終了時に自動的に適用されます。トランスミッタのCRC計算器レジスタからの結果はシフトレジスタに直接ロードされ、受信したCRC値はFIFOに格納されて、レシーバのCRC結果と比較されます。計算に使用されるCRC多項式はプログラム可能であり、CRCパターンの長さは8または16bitフレームのいずれかに設定できます。

拡張されたスレーブ選択信号(NSS)の管理

- NSS入力
 - ハードウェアまたはソフトウェア管理
 - スレーブ・モード – アクティブ・スレーブを選択
 - マスタ・モード – マスタ間で競合
- NSS出力
 - マスタ・モード
 - アクティブ・スレーブを選択
 - 特定のモード



life.augmented

スレーブ選択信号は、通信のスレーブノードを選択するために、マスタノードによってよく使用されます。

信号の実装はマルチマスタおよびマルチスレーブトポロジでは必須ですが、ごくまれな特定の事例を除きます（一般に、MISO データラインの衝突が防止されるとき）。シングルマスタ-スレーブペアでは必須ではありませんが、トポロジに関係なく、データフローの同期に役立ちます。

スレーブ選択信号は、入力または出力のいずれかとして動作します。

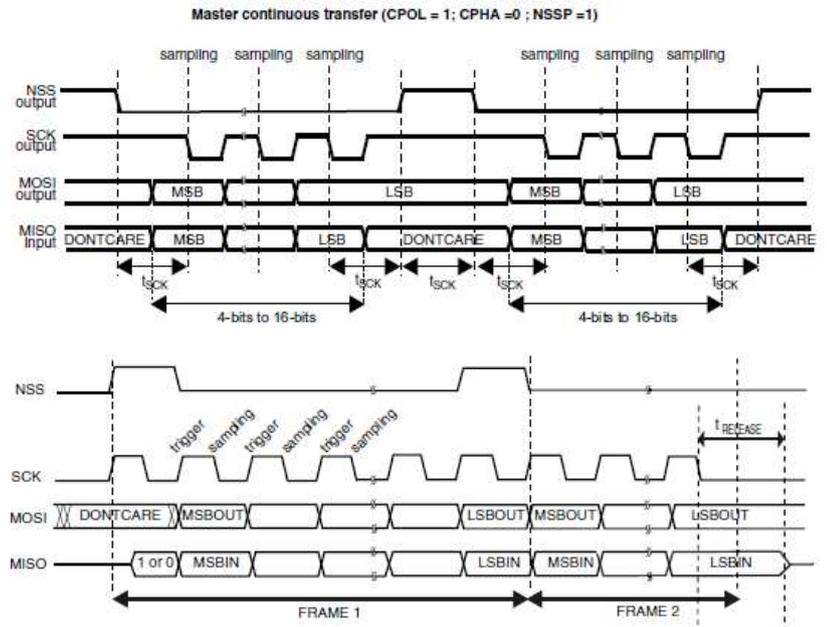
NSS 入力は、マスタまたはスレーブモードで、SSM ビットに応じてハードウェアまたはソフトウェアによって管理できます。

スレーブ入力としては、通信のアクティブスレーブとして自身を識別するために使用されます。マスタ入力としては、マルチマスタシステムにおいて、マスタ間の競合の可能性を知らせます。

出力として機能する NSS は、マスタモードでのみ使用され、標準または特定の制御モードでハードウェアによって管理されます。ソフトウェア制御下の GPIO によって追加のスレーブ選択出力を提供できます。これは、より多くの個別のスレーブ選択信号が適用されるときに必要なことがあります。

スレーブ選択信号(NSS)のハードウェア制御を伴う拡張モード

- NSSパルスモード
 - マスタ・サポートのみ
 - モトローラ・モード(CPHA 0のみ)
- TIモード
 - マスタおよびスレーブのサポート
 - 固定されたCPOLおよびCPHA設定
 - HiZスレーブのMISO自動制御



スレーブ選択信号が特定のハードウェア制御下にあるときには、いくつかの拡張されたモードがあります。スレーブ選択信号はパルスモードで動作でき、その場合、マスタは、連続したデータ転送があるときには、データフレーム間のNSS出力信号で1SPIクロック周期の間、パルスを生成します。

- NSSは、連続トランザクションの場合、1SCK期間のデータフレーム間でハイになります。
 - クロックの極性と位相は固定され、CPOL設定は無視され、CPHAはクリアされた状態に保たれている必要があります。
- もう1つの拡張モードはTIモードです。このモードでは、データフローは、データの最後のビットで、マスタによって供給されるNSSパルスによって同期されます。
- クロックの極性と位相の設定は固定され、バストラフィックが停止すると、特定の設定可能なタイムアウト時にスレーブデータ出力が自動的にハイインピーダンスに切り替わります。
 - CRCがTIモードで適用される場合、CPOL=0 CPHA=1設定を保持する必要があります。

CRCはNSSパルスモードでは適用できません。

割り込みイベント	フラグ	説明
送信FIFOレディ	TXE	Tx FIFOが新しいデータを受け入れる準備ができたときにセット
受信FIFOレディ	RXNE	データがRx FIFOで受信されるとセット
マスタモード・フォルト	MODE	マルチマスタ・バス構成でバス競合が検出されたときにセット
データ・オーバーラン・エラー	OVR	Rx FIFOがフルであるため、レシーバが次のデータ・フローを受け入れることができない
TI フレーム・フォーマット・エラー	FRE	NSS 信号がデータ・フォーマットに対応していない
CRC プロトコル・エラー	CRCERR	受信されたメッセージのチェックサムが、内部で計算された値に一致しない

- DMA アクセスは、TXEおよびRXNE FIFOイベントに基づいて内部的に要求
 - DMAはCRCとデータ閾値制御を自動的に処理



これは、SPI 割り込みイベントの概要です。
 データフローを処理するための FIFO およびエラー検出イベントがあります。
 DMA リクエストは、内部で FIFO 閾値イベントによってトリガされます。

モード	説明
RUN	有効
SLEEP	有効 ペリフェラル割込みによって、デバイスはSLEEPモードを終了
低電力RUN	有効
低電力SLEEP	有効 ペリフェラル割込みによって、デバイスは低電力SLEEPモードを終了
STOP 0	停止 ペリフェラルレジスタの内容は保たれる
STOP 1	停止 ペリフェラルレジスタの内容は保たれる
STANDBY	パワーダウン状態 ペリフェラルは、STANDBYモード終了後に再初期化する必要がある
SHUTDOWN	パワーダウン状態 ペリフェラルは、SHUTDOWNモード終了後に再初期化する必要がある



これは、特定の低電力モードでの SPI ステータスの概要です。デバイスは、STOP、STANDBY、または SHUTDOWN モードでは通信を行うことができません。ペリフェラルが STOP またはパワーダウンモードに入る前に、すべての SPI トラフィックを確実に完了することが重要です。

- 理論的な通信速度限界は、 $PCLK/2$
- 実際の通信速度は、以下に依存
 - SPIバスの容量性負荷（接続されているデバイスの数、入力静電容量、ワイヤの長さ）
 - GPIO内部ボンディング、それらの構成、VDDレベル、および周囲温度
 - SPIクロック信号デューティ比
 - 提供されるセットアップおよびホールド時間/データに必要な時間
 - 連続フローを制御するソフトウェア機能
- 実際のパフォーマンス
 - マスタモードでの最大速度 – 75MHz
 - スレーブモードでの最大速度 – 27MHz

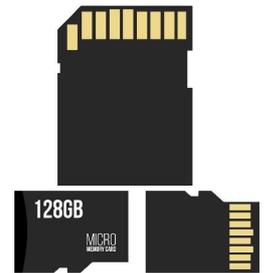


SPI のパフォーマンスは、主に、適用されるクロックに依存します。少なくとも、クロック周波数は必要な通信周波数の 2 倍でなければなりません。実際の通信速度は、アプリケーション要因によって低下することがあります。

ユーザは、ノード数、接続距離、入力静電容量などの SPI バスの負荷と GPIO 設定を考慮する必要があります。高速 GPIO モードは、データおよびクロック信号に適用されます。電源電圧が低く、極端な周囲温度の場合、エッジが遅くなります。

ときにはノード間に、より遅いデータホールドまたはセットアップ時間要件を課さなければならないことがあります。頻繁な例外処理や割り込み不能命令 (LDMIA など) の実行のため、アプリケーションは高速データフローを常に管理できるわけではありません。DMA 容量は、システムで使用される DMA チャンネルの数、頻繁な割り込みサービス、または割り込み不能命令の実行と同様に考慮する必要があります。

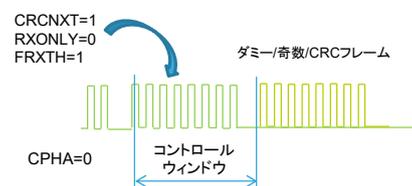
- ディスプレイ
- スマートセンサ
- メモリ
- MMC/SDカード
- IOエキスパンダ



SPIは、複雑な通信プロトコルを必要とせずに簡単なデータ転送が必要な幅広いアプリケーションで使用できます。

Common tips:

- SPI(またはクロック)を無効にする前に、ビジーでないかと FIFOステータスをチェック
- 特定の制御が必要なときには、DMAコントローラを使用 (CRCの処理、RxFIFO閾値の変更、受信専用モード(RXONLY=1)の終了)
- データが1バイトに収まるときには、パケット・モードを使用
- NSSのハードウェア管理には利点がある



具体的な局面:

- CRC情報は受信FIFOにロードされるため、ユーザが一掃する必要がある
- 連続データ・トランザクション時、BSY動作はマスタ・モードとスレーブ・モードで異なる
- 送信操作では、受信およびオーバーラン・フラグがセット(無視してはいけない)
- CRCが適用される場合のDMA ヒント
 - 全二重モードのDMAトランザクションのデータ サイズ
 - 送信 = 送信するデータの数(CRCの長さなし)
 - 受信 = 受信するデータの数 + CRCの長さ (Rxのみモード = 受信するデータの数)



役に立つヒントをいくつか紹介します。

ユーザは特定の手順に従って、低電力モードが適用される前、またはペリフェラルクロックが除去される前に、バス上でトラフィックがまだ実行中かどうかを確認して、そのようなトランザクションフローの早期終了を防止する必要があります。DMA チャンネルがトランザクション完了ステータスを通知した後や、送信 FIFO が空になった後、一定の時間、継続させ、推奨される手順に従う必要があります。CRC や受信 FIFO 閾値の処理のため、または受信専用モードで、特定の制御が適用される必要があるときには、DMA コントローラを使用して、トランザクションを終了してください。そのような制御は、最後の 1 データフレームトランザクション内で使用可能な短い時間枠で排他的に適用される必要があります。これにより、正しいデータ量のトランザクションが確保されます。

DMA および/またはデータパケットフレームが適用される際には、データフローの処理に必要なサービスの数が大幅に減るため、システム全体のパフォーマンスが向上します。これは、データフレームが短く、バスの通信速度が高速であり、データフローが連続的なときには特に有効なアプローチです。

NSS ピンのハードウェア管理は、マスタが単一のスレーブと通信するときには特に必要ではありませんが、スレーブ間でのデータフローの同期に役立ちます。

- SPI ネットワークを設定するときに考慮すべき具体的な局面があります。
- レシーバは常に CRC 情報を受信 FIFO にロードします。ユーザは FIFO に必要な追加領域を考慮に入れて、FIFO から CRC 情報を一掃する必要があります。
- ビジーフラグは、データ処理には使用せずに、トランザクション終了時にバストラフィックの停止を確認するために使用してください。マスタ連続データトランザクション時には、データフレーム間で BSY ビットはクリアされません。スレーブモードでは、データフレーム間で少なくとも 1SPI クロックサイクルだけ常にローになり、通信が連続的かどうかは関係ありません。
- ノードがデータのみを送信するときには、受信チェーンは常にアクティブなままです。この場合、ユーザは関連する受信およびオーバーランイベントのすべてを無視してください。
- CRC を含んでいるとき、DMA コントローラによって処理されるデータの数、転送モードによって異なります。全二重モードでは、トランスミッタとレシーバで異なる数を設定する必要があり、特定の設定は受信専用モードで適用される必要があります。

- 次のペリフェラルを参照してください。
 - リセットおよびクロック制御(SPIクロック・イネーブル、SLEEPモードでのクロック制御、リセット)
 - 割込み(FIFOおよびエラー・イベント)
 - 汎用入出力(速度制御、GPIO設定)
 - DMA



life.augmented

SPIに直接リンクされている、これらのトレーニングを参照してください。ユーザは、SPIの動作に影響する可能性のあるすべてのペリフェラルに習熟してください。

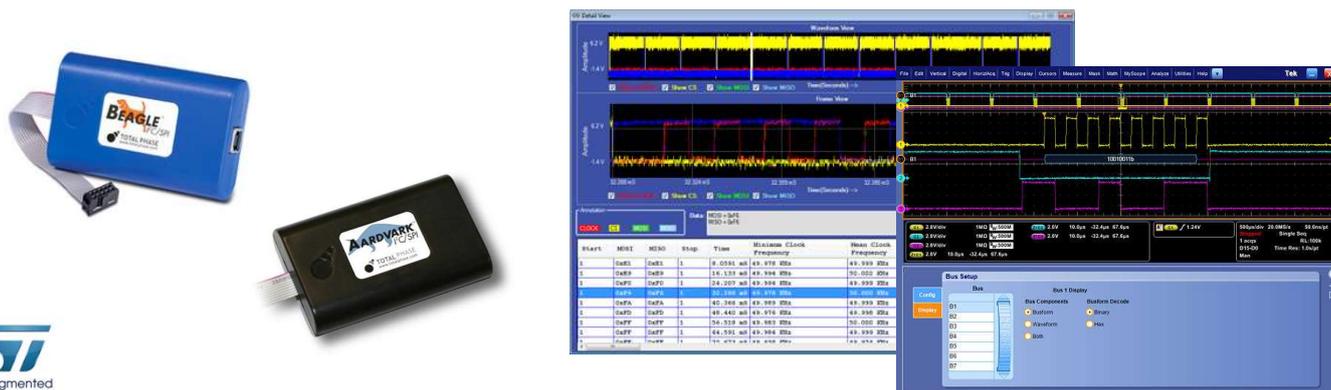
STM32G4インスタンス機能

SPIの機能	SPI1	SPI2	SPI3	SPI4
データサイズ構成可能 4~16bit	はい	はい	はい	はい
32bit RxおよびTx FIFO	はい	はい	はい	はい
ハードウェアCRC計算	はい	はい	はい	はい
TIおよびNSSパルス・モードの拡張	はい	はい	はい	はい
I2Sモード	いいえ	はい	はい	いいえ



STM32G4シリーズマイクロコントローラには4つのSPIがあり、それぞれがこのプレゼンテーションで説明されているすべての機能をサポートしています。うち2つのSPIにおいてはI2S機能を備えています。

- 詳細については、以下のリソースを参照してください。
 - AN4286 - SPI protocol used in the STM32 bootloader
 - AN3364 - Migration and compatibility guidelines for STM32 microcontroller applications
 - Web (接続例、使用可能なモニタリング・ツール)



専用の SPI アプリケーションノードがいくつかあります。一般的な SPI 接続とインタフェース問題の詳細については、多くの Web ページがあり、使用可能な SPI バスモニタリングツールもあります。多くのデジタルオシロスコープは、SPI バスでのデータの直接読取りと分析およびクロック信号をサポートしています。