

電力重畳通信機能を用いたブロック型デバイスの設計と実装

矢敷貴之†1 秋田純一†1

コンピュータの小型化により、ブロック玩具のような非常に小さな筐体にコンピュータを埋め込み、それを組み立てることによって3次元形状モデリングや教材に活用する研究も多くなされるようになった。ブロック型デバイスのような、接続の自由度が高く小さな筐体にコンピュータを搭載する場合には、電源供給路とデータ通信路の確保は普遍的かつ重要な課題となる。本研究では、ブロック間の2本の電氣的接点を用いる電力重畳通信を用いたブロック型デバイスの設計と実装について述べる。この手法により、ブロック間の電氣的接点の小型化とデバイスの小型が容易になる。

Design and Implementation of Block Device with Power Line Communication

TAKAYUKI YASHIKI†1 JUNICHI AKITA†1

The development of computer devices has enabled the small-sized block toys to embed the computer systems, and there were many studies to perform three dimensions shape modeling by assembling the blocks. In the block devices with high flexibility of connection and small size, the ways of powering and communications are important problems. In this paper, we describe the design and implementation of the block device with power-line-communication capability on two electrodes. This device architecture enable to have small-sized inter-block connectors and block devices.

1. はじめに

近年のコンピュータ技術の発展により、家電や自動車といった身近にある様々な機器に高性能なコンピュータが搭載されるようになった。特にコンピュータの小型化の成長は著しく、スマートフォンやタブレットといったパソコンとほぼ性能が変わらないデバイスのポータブル性は非常に高くなった。このようにコンピュータの小型化が進む中で、子供が遊ぶブロックのような非常に小さな筐体にコンピュータを埋め込み、接続したブロック間でデータ通信を行う、インテリジェントなブロック型デバイスに関する研究も幅広く行われている。

そのようなデバイスを実装する場合、コンピュータと入出力装置との接続方法や配置は重要な問題となる。特に、電源及びデータバスの確保は、デバイスがどういったシステムでも必ず付きまとう課題で、機能や風貌を損なわない解決方法が求められる。著者らは、これまで導電性の布素材を用いた衣服につけるウェアラブルデバイスの電源供給の問題を解決できるシステム TextileNet[1]を実装してきた。本稿では、この電力重畳通信に着目し、ブロック型デバイス向けの電力重畳通信方式の実装について述べる。

2. 関連研究

ユーザがブロック型デバイスを用いて、その構成を任意に変更できるインタフェースに関する研究は多数ある。

physical Blocks[2]は、建築構造のモデルを構成することを目的としたタンジブルユーザインタフェース (TUI: Tangible User Interface) である。TUIとは実際の物体に触れることで直感的な操作を可能とするインタフェースである[3]。物理的なブロックを組み合わせ仮想空間にその構造を表示する。コンピュータの3Dモデリングには専門的な知識が必要となるため、初心者や子供には非常に敷居の高い。しかしこの研究では、実物のブロックを構築してモデリングを行うことは容易である点に着目し、実空間のモデリングと仮想空間のモデリングを対応付けた。概形はLEGO Blockのような形をしており、凸上のコネクタに電源を供給するためのバスが2本、通信用のバスが1本備わっている。各ブロックにはマイクロコントローラ (PIC) が埋め込まれており、接続情報をそれぞれのブロック間で相互通信する。最終的にホストPCへ各ブロックの接続情報を集約し、形状認識を行う。ブロック間の接続はシリアル通信であるため、ブロックの接続情報はホストPCへ伝達するまでに複数のブロック (PIC) を通過する可能性があり、その場合、通信のオーバーヘッドが大きくなって遅延が生じる。さらに、ブロックとホストPCまでの伝送路でパケットロスが生じると再送する必要があるため、さらなる遅延が生じてしまう。加えて、ブロックからホストPCまでに経路が複数存在すると、全ての経路にデータが送信され、ネットワークリソースを大幅に消費し、これもまた遅延の原因となる。そのため、リアルタイムに形状を認識することは不可能であり、実際このデバイスでは形状認識を行うタイミングは組み立て後の電源投入時となっている。

†1 金沢大学
Kanazawa University

また、ブロック自体にセンサやアクチュエータを搭載していないため、ユーザの操作意志を組み立てた物体に入力したり、逆にコンピュータから計算結果を出力したりできない。

Active Cube[4]は、直感的な3次元のモデリングとインタラク션을可能にしたユーザインタフェースである。ブロック状のデバイスを組み立てることで3次元形状モデリングを行うことができ、また、ブロックにセンサやアクチュエータなどを搭載することで、ユーザの操作意図やコンピュータの計算結果をデバイスに表示できる。ブロックは1辺が5cmの立方体で面に配置されているホックを用い、接続している。ブロックにはNeuron Chipと呼ばれる8bitのCPUを3個搭載したチップを埋めこまれており、素子の電源は各面の頂点近くに配置されている接続ホックを用いて給電している。こちらは各ブロックとホストPCが平行に接続されているため、接続情報の通信を他のブロックを介して行うことがないため、通信遅延が生じず、リアルタイムな形状認識を実現した。また、ブロックに搭載されたセンサのデータは直接ホストPCへ送信され、計算結果もブロックのアクチュエータに送信されるので、即時応答性のある直接操作インタフェースを構築することができる。そのため、モデリングだけでなく様々なアプリケーションに応用できる。

また、LEGO Blockを用い、リモコンを自分自身で組み立てられるようなデバイスの研究も行われている[5]。ベースのボードにボタン機能を持つブロックを好きな場所、好きな個数載せることで、使うユーザに最適化されたリモコンを組み立てることができる。

これらのどの研究におけるインタフェースでも、デバイス同士の接続は自由に変えられるが、物理的な電源路や(単数あるいは複数の)データバスが独立に用意されており、それによって物理的構造に制約ができるという問題点がある。

3. 電力重畳通信機能を持つブロック型デバイスの設計と実装

3.1 システムの概要

本研究では、信号と電源を重畳させることで、ブロック間をつなぐバスの最適化を試みた。一般に広く普及しているLEGO Blockをモデルとし、マイコン(Cypress社CY8C29466)を利用して、ブロック間でデータを相互通信する。各ブロックは4つの双方向通信チャンネルをもつ。各ブロックは送信部、受信部、電源部で構成されている。全体の構成を図1に示す。

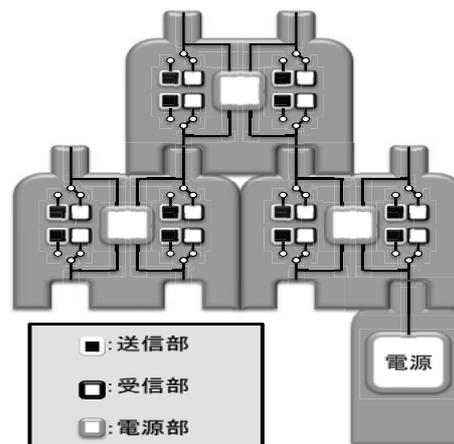


図1: ブロック型デバイス向け電力重畳通信システムの構成

Fig.1: System configuration of power line communication system for block device

3.2 電力重畳通信の方式と回路構成

電力重畳通信では、1本の信号線に信号及び電力を重畳させ、周波数の違いから信号と電源を分離させる方式が一般的である。つまり、電源(直流電圧)が必要なところにはインダクタによるローパスフィルタを、通信信号(交流信号)が必要なところにはキャパシタによるハイパスフィ

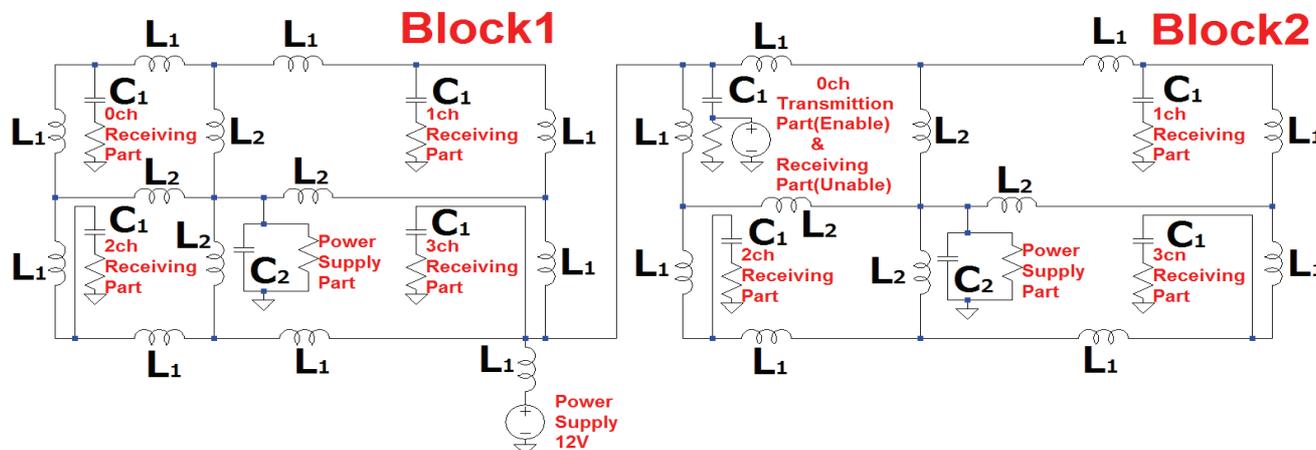


図2 ブロック型デバイス向け電力重畳通信回路の全体

Fig.2: Power line communication circuit for block device

ルタを用いることにより信号を分離する[6]。設計したブロック型デバイス向けの電力重畳通信回路の構成を図2に示す。以下で、その動作原理について述べる。

なおこの回路では、通信信号であるパルスは、通過するハイパスフィルタの特性によって図3のように送信側と受信側で波形が変化する。そこで送信データをパルス変調し、1ビットごとに値の“0”・“1”をパルスのあり・なしに対応させて送信し、受信側ではこのパルスから1ビット分の“0”を生成することで復号する。これらの送信時の変調と受信時の復調は、マイコン(PSoC)のユーザーモジュールにより実装した。

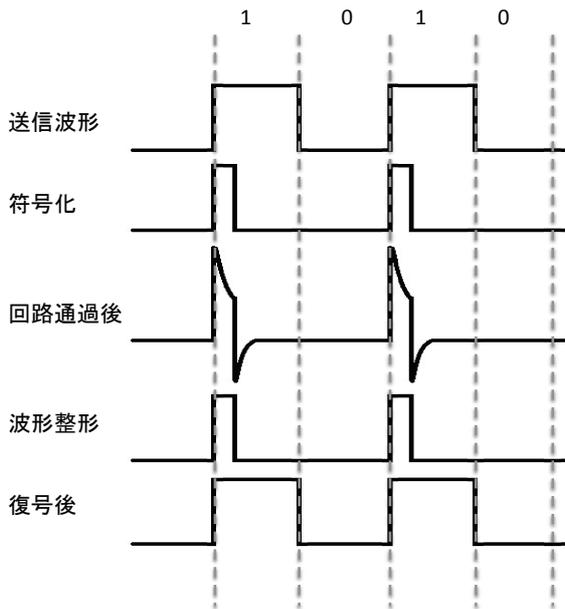


図3 送信データの変調と復調

Fig.3: Modulation and demodulation of transmitted data

なおこのような通信を、接続された全ブロックに対してブロードキャストするのではなく、隣接するブロック間のみで行うように限定することで、ブロック間の接続情報を取得するなど、システムの機能を拡張しやすくなる。ただし各ブロックへの電力供給の観点からは、全ブロックのチャンネルは直流的にはすべて接続されている必要がある。そこで隣接するチャンネル間のみ通信信号が送信され、それ以外のチャンネルには通信信号が送信されないようにするために、図4のようにインダクタ L_1, L_2 とキャパシタ C_1 からなる回路構成とした。この L_1 によって直接接続された送受信チャンネル間以外では交流信号である通信信号は L_1 のインピーダンスによって十分減衰する。その一方で直流である電力は各チャンネルに等しく供給される。ただし、 L_1 の直列抵抗によって供給電力の電圧が低下するため、なるべく直列抵抗の小さいインダクタを用いる必要がある。

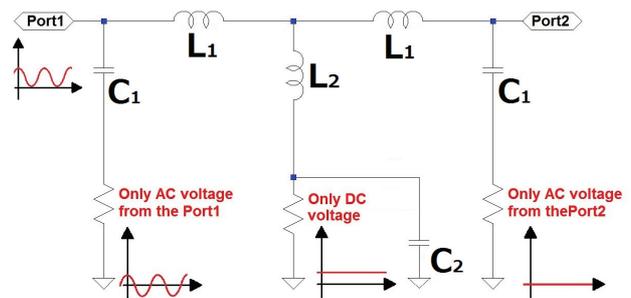


図4 電力重畳通信の原理図

Fig4: Figure of principle of the electricity excellence communication

一方、送信回路と受信回路と各チャンネルの間には C_1 を置く。これによって交流信号である通信信号はここを通過し、直流である電力はカットされる。 C_1 の適切な値を選定するために、回路シミュレータLTspiceを用い、図2の回路にて C_1 を変更しながら過渡解析を行った。図2において、Block2の0chからBlock1の3chへ図5に示す矩形波を送信し、受信波形をシミュレートした。 C_1 が1[nF]の結果と、1[uF]の結果をそれぞれ図6、図7に示す。図6の波形では、送信信号に比べ高周波の信号が確認できるが、これは容量値が小さいため、ローパスフィルタのカットオフ周波数が高くなることが原因である。

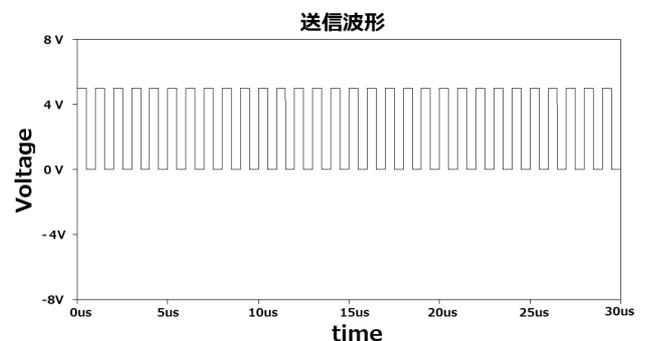


図5 送信波形

Fig.5: Send wave

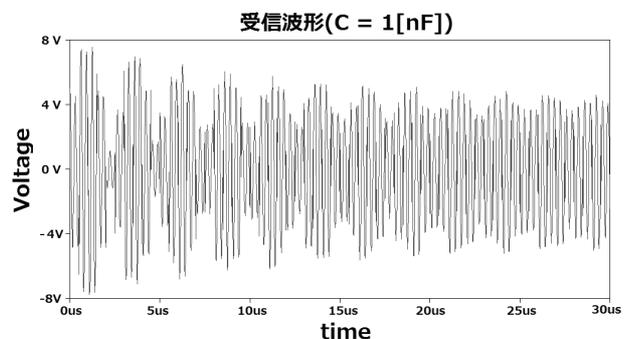


図6 過渡解析の結果($C_1=1$ [nF])

Fig.6: Simulation result($C_1=1$ [nF])

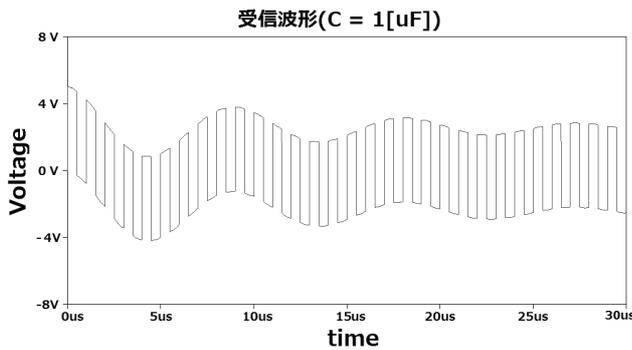


図 7 過渡解析の結果($C_1=1[\mu\text{F}]$)
Fig.7: Simulation result($C_1=1[\mu\text{F}]$)

一方、容量値を大きくすると直流バイアス成分はカットされるものの、概ね送信波形を保った波形が確認できた。この結果から、 C_1 は $1[\mu\text{F}]$ とした。

隣接するチャンネル間で通信信号を十分に減衰させるためには、交流成分に対するインダクタのインピーダンスをできるだけ大きくする必要がある。それにはインダクタ値を大きくするか、信号の周波数を大きくする必要があるが、前者は素子の大きさや値の現実的な大きさから制限が加わるため、本研究では信号の周波数を高くする方策をとった。今回、マイコン(PSoC)が生成可能なパルス周波数とインダクタのサイズや直列抵抗から、通信速度を $1[\text{Mbps}]$ 、チャンネル間の L_1 を $10[\mu\text{H}]$ とした。なお、供給される電力の直流電圧は $12[\text{V}]$ とし、これを内部で用いる $3.3[\text{V}]$ に降圧する電源回路と各チャンネルの間には L_2 を置く。また、 L_1 と L_2 の値の関係が重要で、 $L_1 > L_2$ でなければならない。電源部のインピーダンスはバイパスコンデンサ C_2 によって交流信号においては小さくなり、信号電圧は L_1 と L_2 の直列接続の回路にかかるとみなせる。 $L_1 > L_2$ にすることで L_1 に信号電圧を吸収させ、他チャンネルへの信号伝達を防ぐことができる。そのため、 L_2 は $1[\mu\text{H}]$ とした。

設計したブロック型デバイス向け電力重畳通信回路である図 2 の回路に対して、LTspiceにて周波数特性の解析を行い、ブロック間の通信信号の減衰特性の評価を行った結果を図 8 に示す。

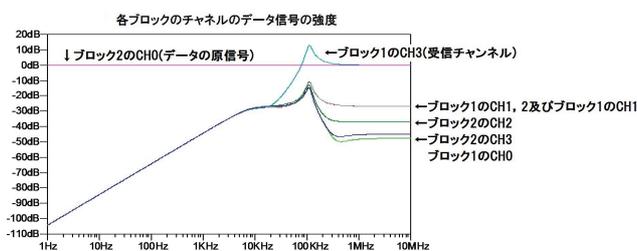


図 8 ブロック間の通信信号の減衰の周波数特性
Fig.8: Frequency properties of the decrement of the communication signal between blocks

この結果から、ブロック間の共振周波数は約 $100[\text{kHz}]$ であり、 $1[\text{Mbps}]$ での通信信号は十分に減衰することが確認された。なお、接続するブロック数をこれより増やして同様のシミュレーションを行ったが、共振周波数の変動はほぼ見られなかった。

3.3 接触時のノイズとその解決法

ブロック同士を接触させたときに、重畳ライン(通信経路)に図 9 示すノイズパルスが発生することが確認された。重畳ラインに通信以外でパルスが発生すると、処理部がそのパルスを信号と認識してしまい、誤作動を起こしてしまう。観測の結果、複数のノイズパルスが連続して発生することはないということが確認された。この現象が引き起こす誤作動を解決するために、1バイトのデータを送る前に、必ず1バイトのパリティデータを送ることを考えた。ノイズパルスの特性を考慮して、連続パルスを発生させるデータをパリティに採用し、受信側でこのパリティデータをチェックすることで誤認識を防止した。

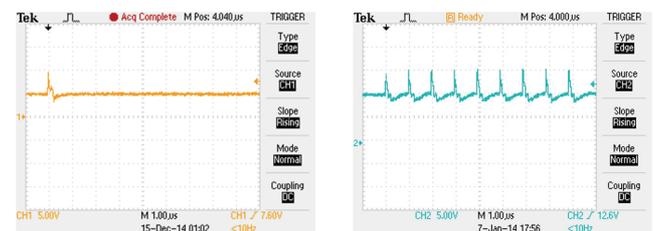


図 9 ノイズ波形(左)とパリティ波形(右)
Fig.9: Noise pulse (left) and parity pulse (right)

3.4 ブロック型デバイスの Arduino 化

ブロック型デバイスの電力重畳通信の実現には PSoC を使用しており、このデバイスを使ったアプリケーションの開発には PSoC の開発知識が必要となる。また、ユーザーモジュールや内部配線をほぼ電力重畳通信に利用しているため、PSoC はスペックの関係上、外部のセンサやアクチュエータとの連携や拡張が難しい。そこで、アプリケーション開発と外部モジュールとの連携や拡張をより容易にするため、スタンドアロン型のワンボードマイコンから構成されたシステム、Arduino に着目し、ブロック型デバイスを Arduino に対応させた。電力重畳通信機能を担っている PSoC とデータ制御を行うマイコン (ATmega328P) を分け、お互いにシリアル通信を行うことで、電力重畳通信機能をブラックボックス化し、その機能を Arduino で容易に利用できる。また、ATmega328P はアナログまたはデジタルの入出力ピンやモジュールが、電力重畳通信機能の実装で制限のある PSoC に比べ豊富に設定でき、さらにプログラム開発環境として平易な ArduinoIDE を用いられることから、幅広いユーザーによるプログラム開発が用意となる。PSoC と ATmega328P 間の通信は 3 バイト 1 セットで通信が行われ、1 バイト目は 3.3 節で述べた固定のパリティ、

2 バイト目はチャンネル情報, 3 バイト目にデータをそれぞれ設定する. また, 通信速度は 9600[bps]である.

3.5 デバイスの概形

3.2 節で設計したブロック 1 個あたりの電力重畳通信回路をプリント基板上に実装し, 図 10 に示すように上下 2 枚の基板から構成される. その基板にそれぞれ金属の円柱を接合して凹凸を形成, ブロック同士を物理的に組み合わせることができる. また, ブロック同士の電氣的接続には, 各ブロックに共通となる GND ラインが必要である. そこで, 互いの金属円柱を接触させることで GND ラインが共通となる. また, 重畳ラインの端子にはネジ (上部), およびバネ (下部) を採用した. このような端子にすることでブロック同士をはめるとネジとバネが接触し, ブロック間の重畳ラインを確保できる. デバイスの構造を図 11 に示す. なおブロックの寸法と外形は図 12 のように LEGO Block にあわせ, 32[mm]×16[mm]×9.6[mm]とした.

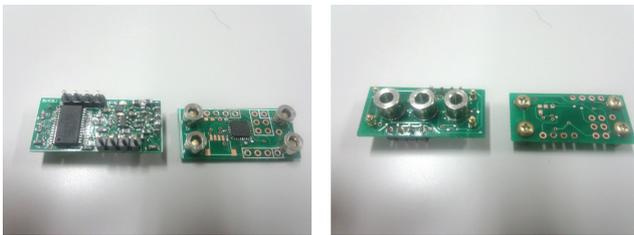


図 10 本体基板

Fig.10: Developed body and main board

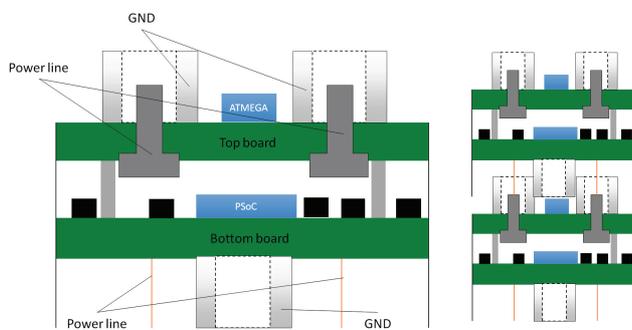


図 11 デバイスの物理構造 (左:1 個分, 右:2 個を積み重ねた状態)

Fig.11: Device of architecture (Left: single block, Right: two stacked blocks)

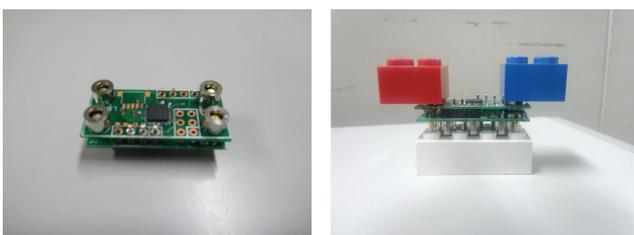


図 12 試作したブロック型デバイスの外形

Fig.12: Developed block device

3.6 ハードウェアの面からみる課題点

今回設計した基板で実装したブロックデバイスは, チャンネルが上下に 2 つずつ計 4 つのみであり, ブロック同士の電氣的接続も上下に積み重ねるようにしなければ, 電力重畳通信ができない. 本来, このサイズの LEGO Block には上面の凸部分が 8 つあるため, 上下合わせて 16 チャンネル設け, 接続の自由度をあげることが望ましい. しかし, 3.4 節でも述べたが PSoC のスペックの関係上, 配置できるユーザモジュールに制限があり, 1 個の IC で 4 チャンネル分の受信部しか構成できない. 解決策として, 複数の PSoC または小型 FPGA や専用 LSI による通信制御回路を用意し, それらを ATmega328P で管理することで, チャンネル数を増やすことができる.

4. アプリケーション

4.1 形状認識にむけたアプリケーション

本研究のブロック型デバイスは様々なアプリケーションに発展させることができると考えられる. 例えば Physical Blocks や Active Cube のように, ブロックによって組み立てた構造を, ブロック間の接続情報とブロックの形状の情報から取得できるため, 3D モデリングや教材, エンタテインメント方面の応用が考えられる. 今回, 様々な発展に有用と思われるブロック型デバイスを使った形状把握に向けて, ブロック間の接続情報を管理するアプリケーションの開発を行った.

4.2 接続情報の更新と取得

各ブロックは一意の ID と, 接続先のブロック ID を格納する配列をもち, この配列の要素番号はチャンネル番号と対応している. また, あるブロックがホスト PC へ最短で経由するブロックの数を距離と定義し, 各ブロックは自分自身の距離情報と接続先の距離情報を保持する. この情報は, 複雑に構成されたブロックネットワークから, ホスト PC へデータを届けるために利用する. データをホストへ届ける際は, 距離情報の小さいブロック ID を選択してデータを送出することで確実にホスト PC へデータを届けることができる.

各ブロックは保持する接続情報の更新をホスト PC のコマンドによって受動的に行う. リアルタイムに認識するためには, ブロックを接続あるいは外した際にブロックが能動的に接続情報を更新し, 接続情報を送信する必要がある. しかし, 外した際の更新処理は, 重畳線を監視するだけでは実現できないため, 定期的にブロック間で自動更新を行う機構が必要となり, その実装は今後の課題となる.

ホスト PC から取得コマンドが送信されると, ネットワークを形成している全てのブロックから各チャンネルに接続しているブロックの ID とその距離情報がホスト PC へ送られ, リスト形式で確認することができる.

4.3 形状把握実験

このアプリケーションを用い、図 13 に示す 4 個のブロック型デバイスを積み重ねるように接続したときに、構造物の接続情報を確認できるプログラム結果を図 14 に示す。受信履歴のテキストボックスに接続情報のリストが表示され、ブロック ID とチャンネルごとの (ID, 距離) を表示している。未接続の場合は ID, 距離ともに 255 のデータが表示される。また、ホスト PC は ID および距離を 0 で表している。このリストと既知であるブロックの形状を合わせることで、組み立てた形状を再現することが可能である。

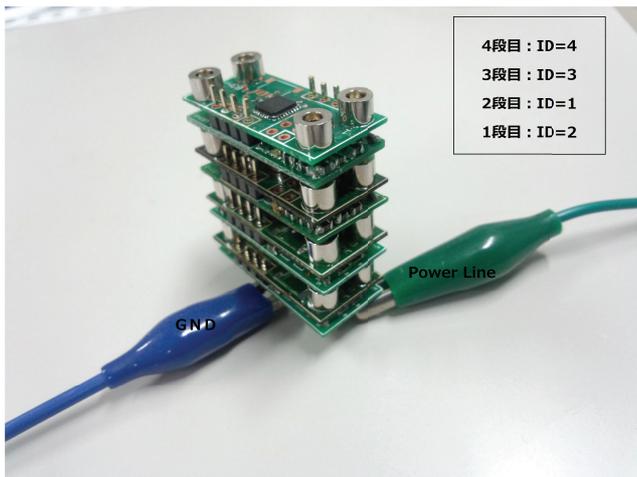


図 13 構造物の形状把握実験

Fig.13: Experiment of grasping sharp

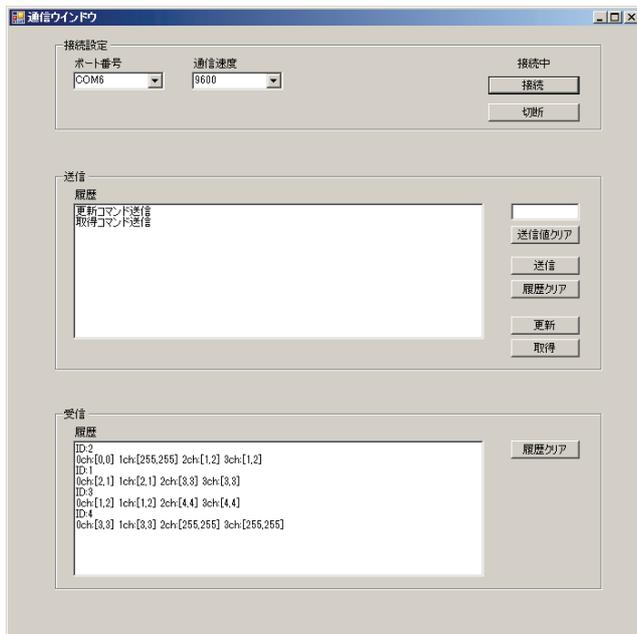


図 14 接続情報の更新と取得画面

Fig.14: Connection information are acquired, and a list of the information is displayed on a screen

5. まとめ

本稿では、ブロック型デバイス向けの電力重畳通信方式と、その回路構成、およびそれを備えるブロック型デバイスの試作について述べ、実装したブロック型デバイスが電力重畳通信可能であることを示した。また、ブロックデバイスを使って組み立てた構造物の形状を再現することが可能であることを示した。今後の課題として、通信チャンネルの増設、リアルタイム認識、および再現した形状の視覚化などが挙げられる。また、ブロックにセンサやアクチュエータを搭載することで、汎用的なブロック型システムのインフラとなりうる。

謝辞

本研究の着想にあたり、立命館大学の松村耕平氏には、有意義な助言をいただいた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 秋田純一, 村上知倫, 戸田真志: ウェアラブルコンピュータ向けの導電性衣服上の電力重畳通信回路, 電子情報通信学会技術研究報告 107(163), ICD2007-64, pp.159-164 (2007).
- 2) D.Anderson et al.: Tangible interaction + graphical interpretation: a new approach to 3D modeling, in Proc. of SIGGRAPH2000, pp. 393-402 (2000)
- 3) 石井裕: タンジブル・ビット -情報と物理社会を融合する-, 新しいユーザ・インタフェース・デザイン, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6, pp.1338-1347 (2001).
- 4) 伊藤雄一, 北村喜文, 河合道広, 岸野文郎: リアルタイム 3次元形状モデリングとインタラクションのための双方向ユーザインタフェース ActiveCube, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 6, pp. 1338-1347 (2001).
- 5) K. Matsumura, Y. Sumi: Blockon: a block based buildable remote controller, Proc. of the 11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia Article No.46 (2012).
- 6) 飴山剛史他: 導電性衣服上の小信号振幅電力重畳通信トランシーバの基礎研究, LSI とシステムのワークショップ 2010 予稿集, pp.288-290 (2010).