

## 共有ブロックを用いた実物体共有対称型 遠隔地作業支援システム

佐藤究<sup>†</sup> 佐藤奈摘<sup>†</sup> 小笠原直人<sup>†</sup> 布川博士<sup>†</sup>

実空間での実物体を用いた組み立て作業を遠隔地から支援するシステムとして様々な研究がなされている。しかし、操作の対称性および、作業対象の対称性の両立には課題が多い。

そこで本研究では、自由な形状の作業対象物を完全な同一の実物体として共有可能な対称的作業空間の実現を目的とした、共有ブロックを用いた遠隔地作業支援システムを提案する。具体的には、作業対象物を構築可能な部品を双方に用意し、その部品に部品自ら利用者の組み立てを感知し、遠隔地の部品を通じて直感的にユーザに組み立て方を提示するインテリジェント性を持たせることにより、作業対象物および作業対象への操作の共有を実現し、対称的な作業空間の共有を行う手法を提案する。

### Symmetrical Remote Collaboration System for the Real Object Manipulation Work by Shared Block

Kiwamu Sato<sup>†</sup>, Natsumi Sato<sup>†</sup>, Ogasawara Naohito<sup>†</sup> and  
Hiroshi Nunokawa<sup>†</sup>

Many studies of remote collaboration system for the real object manipulation work are performed. However, it is difficult to coexist in the symmetry of the manipulation and the symmetrical existence of real object.

In this paper, we propose the remote collaboration system for the real object manipulation work using shared block to solve it. The shared block is a part that can express various shapes as well as the block of the toy. It contains a CPU, Zigbee module, and two-color LED. It is the intelligent part that has the ability of sensing connection between self and other blocks, sending connection map to remote blocks, and presentation the assembly process to the remote user.

## 1. はじめに

実空間での実物体を用いた組み立て作業を遠隔地から支援するシステムとして様々な研究がなされている。その一つとして、作業者の作業空間に作業対象となる実物体（以下、作業対象物とよぶ）をおき、指示者は作業者視点や作業者の周りに配置されたカメラ画像から作業状態を把握し、音声、映像、レーザーポインタ等の指示デバイス、あるいはARを用いて作業の指示を行うシステム[1]がある。このようなシステムは、指示者と作業者の立場が明確に決まってしまうため、指示は可能であっても、互いに協調するコラボレーション的な作業が困難である。同時に、作業対象物は作業側には無いため、指示者は作業対象物に物理的に直接アクセスできない。そのため、直感的な作業指示が困難であり、作業者の作業状況を直感的に把握することも困難である。

この様な問題を解決するためのシステムとして、VR、AR（あるいはMR）を用いた作業空間、作業対象物を共有するシステムがある[2][3][4]。しかし、これらのシステムにおいても、作業対象物を完全な同一の実物体として共有していない非対称な作業空間共有であるため、双方が自分の望む瞬間に自分の望む視点から作業対象物を眺めたり、協調的、試行錯誤的に操作を試行したりすることは不可能であり、直感的な作業指示や、作業者の作業状況の直感的な把握は依然困難である。

また、MR、VRを用いて、双方にセマンティックが同じである作業対象物を置き、それに対する操作のシンタクスを変換することにより、対称的な操作を共有するシステムがある[5][6][7]。これらのシステムにおいては、対称的な操作は可能であるが、作業対象の完全な対称性を実現することができない。

そこで本研究では、自由な形状の作業対象物を完全な同一の実物体として共有可能な対称的作業空間の実現を目的とした、共有ブロックを用いた遠隔地作業支援システムを提案する。具体的には、作業対象物を構築可能な部品を双方に用意し、その部品に部品自ら利用者の組み立てを感知し、遠隔地の部品を通じて直感的にユーザに組み立て方を提示するインテリジェント性を持たせることにより、作業対象物および作業対象への操作の共有を実現し、対称的な作業空間の共有を行う手法を提案する。

## 2. 実物体共有対称型遠隔地作業支援環境

### 2.1 実物体を用いた作業対象物共有

一般に作業対象物を用いた共同作業において、作業対象物に物理的にアクセス可能であることの重要性は様々な形で議論されているが、本研究では、以下の2点から極めて重要であると考えられる。

<sup>†</sup> 岩手県立大学ソフトウェア情報学部  
Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

### (1) 直感的な作業状況の把握

作業対象物を実際に手に取り、自分の望む瞬間に自分の望む視点から作業対象物を眺めたり、試行錯誤的に操作を試行したりすることにより、直感的に作業状況を把握することが可能となる。

### (2) 直感的な作業指示

相手に作業対象物を用いて作業を例示したりすることによって、直感的な作業指示が可能となる。

遠隔地でこのような作業環境を構築するために、以下のような手法が考えられる。

(a) 同種の作業対象物を双方に搬送し、作業指示を音声、映像、あるいはレーザーポインタのような指示デバイスを用いたコミュニケーション手段で行う。

(b) VR や AR (あるいは MR) を用いた作業空間、作業対象物を共有するシステムの利用

(c) VR や MR を用いた、形状が異なるが同一の操作が可能な作業対象物に対する操作を共有するシステムの利用

しかし、(a) においては作業内容に応じて作業対象物を毎回搬送するのは実際的ではなく、作業対象物の対称性を実現することが困難である。また自分の作業対象物への操作結果が相手の作業対象物に反映されることは無く、作業の対称性が実現されていないと言える。(b)、(c) においては、作業の対称性は実現可能であるが、相手の作業対象物と同一の物体に物理的にアクセスすることは不可能であり、作業対象物の対称性は完全には実現されていないと言える。

そこで、本研究では、以下の2点を実現する実物体共有対象型遠隔地作業支援環境を目標とする。

#### (1) 作業対象物の対称性の実現

同種の作業対象物を双方に搬送すること無く、双方に存在させることにより、双方が作業対象物に物理的にアクセス可能な環境の実現。

#### (2) 作業の対称性の実現

互いの作業対象物への操作結果が相手の作業対象物に反映される環境の実現。

## 3. 実物体共有対称型遠隔地作業支援システム

### 3.1 作業対象物の対称性

遠隔地に、自由な形状の作業対象物を搬送することなく存在させる手法として、3DプリンタやNCマシンの利用が考えられるが、それらの設置や価格を考慮すると実際的ではない。そこで本研究では、一般の作業対象物が基本部品から構成されることに着目し、双方に基本部品を多数用意し、双方が同形に組み立てることにより自由な形状の作業対象物の対称性の実現する。

現段階では、組み立ては双方のユーザ自身が行うことを想定している。理由は、組み立て後に、作業として部品の着脱が行われることを考慮すると、組み立て自体も作業の一環としてユーザにシームレスに提示するほうが自然であるからである。

### 3.2 作業の対称性

組み立てや部品の着脱の作業を他方に反映させるためには、なんらかの手段で作業内容を他方に伝える必要があるが、音声や映像等の別チャンネルを用いて伝達することは不自然である。対面実空間環境においては、作業対象への操作は作業対象そのものの変化として伝わるものであり、それが極めて直感的かつ自然である。そこで、本研究では、ユーザの部品自体が作業を感知し、遠隔地の部品へ作業内容を転送、さらに受け取った部品自体が作業をユーザにアフォードし、それに基づき作業を行うことにより、作業結果を反映させることにより作業の対称性を実現する。すなわち、部品自体が他の部品との接続状況や着脱を感知し、さらにそれを遠隔地側のユーザに伝えるUIを有するインテリジェントな部品により、作業の対称性を実現可能とする。

### 3.3 実物体共有対称型遠隔地作業支援環境

以上から、(1) 部品自体が他の部品との接続状況や着脱を感知、管理するモデリング機能、さらに(2) それをユーザに伝える作業提示機能、の2つを持つインテリジェントな部品が双方に多数存在する環境が、自然かつ直感的に、作業対象物および作業の対称性を実現する、実物体共有対称型遠隔地作業支援環境の実現となる。

## 4. 共有ブロックを用いた実物体共有対称型遠隔地作業支援環境

我々は、前章で述べた双方に配置する部品形状として玩具として一般的に利用されているブロックを用いることとし、このブロックを共有ブロックと呼ぶ。共有ブロックの形状としては長方形の8ピンのもの採用した。多くの人が少なからず利用経験があること、極めて高い物体表現能力があることが理由である。

この共有ブロックは、ユーザの組み立てをブロック自身が自動的に把握するモデリング機能、内蔵LEDにより遠隔地ユーザの組み立て方をもう一方のユーザに伝える作業提示機能の2つの機能を持つインテリジェントなブロック(図1, 7)であり、本システムはこれを用いることによりブロックの組み立て作業を遠隔地で容易かつ直感的に共有することがシステムである。

実際には、完全なインテリジェント性をブロック単体で実現するのは困難なため、部品本体である共有ブロックと、それを管理する共有ブロック管理システムからなる。

### 4.1 モデリング機能

モデリング機能はユーザの組み立て操作から、部品の着脱、接続状況をリアルタイムに感知、システム内に取得する機能である。

モデリング機能に関しては同種の研究として、ActiveCube[8][9]、Legoを用いたもの

[10], 石井らの三角形のブロックを用いたもの[11], プログラミングを目的としたアルゴブロック[12]等がある.

本研究では, システムにモデリング情報を入力するだけではなく, それに基づいた遠距離での自由度の高いインタラクションが目的である. そのため, リアルタイム性, 組み立ての自由度(無線, ベースブロックを必要としない等), 高い物体表現能力(ブロック形状, 物理的な接続制限等)を合わせ持つブロックが必要となる. 特に本研究では高い物体表現能力を重視しており, 8ピン玩具ブロック形状を採用することにより, 他研究より組み立ての自由度が格段に高くなっている.



図 1 共有ブロックの外観と内部

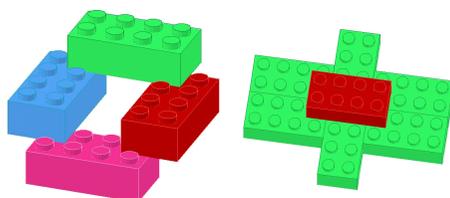


図 2 考慮すべき接続形状 (1)

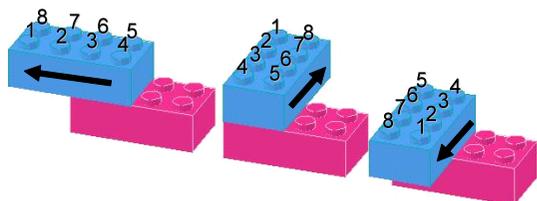


図 3 考慮すべき接続形状 (2)

しかし, ブロック間の接続関係も複雑になるため, ベースブロックを起点として接続状況を隣接ブロックに順に問い合わせて接続状況を取得する手法では実現が困難であると考え, 本システムでは, 各ブロックを自立的に動作させ, 隣接ブロックとの接続状況だけを入手し, 作成対象物全体の構造は管理システムに集めることにより全体のモデリング情報を管理することにした.

玩具ブロック形状を用いたことにより, 接続形状としては, 図 2 の様に, 複数のブロックにまたがった接続やループ上の接続を考慮しなければならない. また, 2 個のブロックの同じピンを使用した接続においても, 方向を考慮すると図 3 の様な 3 種類が考えられる. 逆に図 4 のように組み立て形状が同じであっても, 接続ピンが違う接続形状も考えられる. 現段階では 8 ピン直方体のブロックのみしか用いていないため問

題とならないが, 様々な形状のブロックや様々な入出力機能を持つブロックの実装を検討しているため, 対応の必要がある.

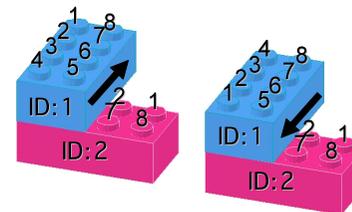


図 4 考慮すべき接続形状 (3) および, ブロック ID とピン番号

以上から, モデリング状況を表現するためには, ブロック上部の 8 カ所の凸部のピン(以下アッパーピンと呼ぶ), とブロック下部の 8 カ所の凹部の穴(以下ローピンと呼ぶ), 合計 16 カ所のピンの接続状況を記述する必要がある. すなわち全ブロックの全ピンにおいて, 接続先のブロックとピンの対応を表現しなければならない. そこでブロック ID とピン番号を用いて, 以下のように, 各ブロックのアッパーピンの接続状況を格納するサイズ 8 の配列とローピンの接続状況を格納するサイズ 8 の配列によってブロック接続状況マップとすることとした.

#### ID:ブロックの ID

Upper Pin:( (アッパーピン 1 に接続されるブロックの ID, アッパーピン 1 に接続されるブロックのピン番号), (アッパーピン 2 に接続されるブロックの ID, アッパーピン 2 に接続されるブロックのピン番号), ..., (アッパーピン 8 に接続されるブロックの ID, アッパーピン 8 に接続されるブロックのピン番号) )

Lower Pin:( (ローピン 1 に接続されるブロックの ID, ローピン 1 に接続されるブロックのピン番号), (ローピン 2 に接続されるブロックの ID, ローピン 2 に接続されるブロックのピン番号), ..., (ローピン 8 に接続されるブロックの ID, ローピン 8 に接続されるブロックのピン番号) )

例えば, 図 4 左の場合は,

ID:1

Upper Pin:(-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1)

Lower Pin:(-1,-1), (-1,-1), (2,4), (2,5), (2,6), (2,3), (-1,-1), (-1,-1)

ID:2

Upper Pin:(-1,-1), (-1,-1), (1,6), (1,3), (1,4), (1,5), (-1,-1), (-1,-1)

Lower Pin:((-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1))

図 4 右の場合は,

ID:1

Upper Pin:((-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1))

Lower Pin:((2,6), (2,3), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (2,4), (2,5))

ID:2

Upper Pin:((-1,-1), (-1,-1), (1,2), (1,7), (1,8), (1,1), (-1,-1), (-1,-1))

Lower Pin:((-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1), (-1,-1))

と表現される。なお未接続は、ブロック ID, ピン番号ともに-1 で表現する。

## 4.2 操作提示機能

遠隔地ユーザの着脱操作をもう一方のユーザにブロック自身が伝える機能であり、アッパーピン上部に埋め込まれた 2 色 LED (赤, 緑) と電子音 (現システムでは共有ブロック管理システムが動作する PC 上で再生される) によって実現される。

### 4.2.1 ブロック接続指示

図 5 左上のように片方のユーザ (仮に指示者と呼ぶ) が組み立てた場合、遠隔地にいるもう片方のユーザ (仮に被指示者と呼ぶ) のブロックの LED が図 5 左下のように点灯し組み立て操作をユーザに提示する。下になるブロックの接続部分の対角において、片方が赤色点灯、もう一方が赤色点滅し、上になるブロックの接続部分の対角において、片方が緑色点灯、もう一方が緑色点滅する。各色の点灯と点滅が重なるように組み立てることで一意に組み立てを行うことができる。また、被指示者が正しい組み立て操作を行った場合は正解音 (ピンポン)、間違っただけの場合は不正解音 (ブー) となる。複数のブロックにまたがる場合 (図 5 中上) や、ブロックが重なっている場合 (図 5 右上) は、それぞれ図 5 中下, 図 5 右下のように点灯することで操作を指示する。

### 4.2.2 ブロック分離指示

ブロックを取り外した場合は、2 色 LED (赤, 緑) の同時点灯 (オレンジ色に見える) で分離を指示する。作業対象物の上側のブロックを分離する場合は、そのブロックの全 LED がオレンジ色の点滅 (図 6 上), 下側のブロックを分離する場合は、そのブロックの形で最上部の LED がオレンジ色に点灯 (図 6 下) する。複数のブロックが同時に取り外された場合は、被指示側の共有ブロック管理システムが構造を解析し、複数回の 1 つのブロックの分離指示に分解して提示する。この機能に関しては現段階では未実装である。

## 4.3 作業モード

システム上は双方とも、自由なタイミングで指示者と被指示者になることが可能であるが、作業の進行を考慮し、現在以下の 3 種類の動作モードを実装している。

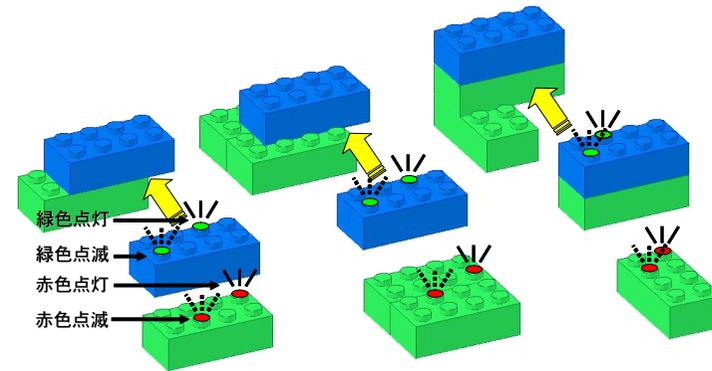


図 5 ブロック接続指示時の LED 点灯パターン

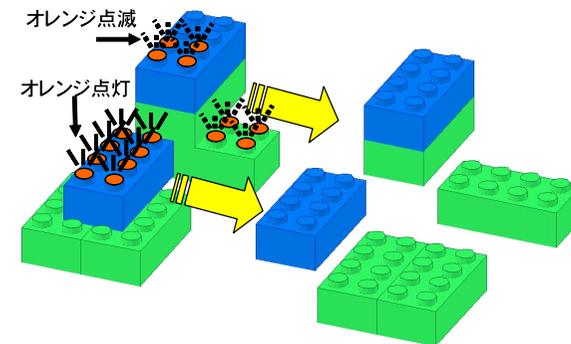


図 6 ブロック分離指示時の LED 点灯パターン

### (1) リアルタイム組み立て共有作業モード

リアルタイム組み立て共有は、指示者と被指示者が 1 つのブロックを組み立てるたびに、立場を交換しながら行う作業モードである。双方が協調しながら試行錯誤的に作業を行う場合に有効であると考えられる。

### (2) リアルタイム形状共有作業モード

指示者側が全ての形状を試行錯誤的な組み立てを終えてから、その形状を送信し、被指示者に組み立て手順をまとめて提示しまとめて組み立てる作業モードである。

### (3) 非同期形状共有作業モード

指示者側が全ての形状を試行錯誤的な組み立てを終えてから、その形状を保存しておき、被指示者が必要なときに組み立て手順を再生して、まとめて組み立てる作業モードである。

## 5. 実現システム

本システムは、共有ブロックと PC 上で動作する共有ブロック管理システムからなる。共有ブロック管理システムは作業空間に1つ設置され、その作業空間内で利用する共有ブロックを管理下におく(図7)。共有ブロックと共有ブロック管理システムは Zigbee を用いた短距離無線通信で接続され、共有ブロック管理システム間はインターネットで接続される。共有ブロックはそれぞれ自律的に動作し、共有ブロック管理システムと、LED の点灯、点滅、消灯指示、および、接続状況の報告、問い合わせのコマンドを送受信する。共有ブロック管理システムは個別の共有ブロックの接続状況を把握し、作業対象物全体のブロック接続状況マップを保持、管理する。

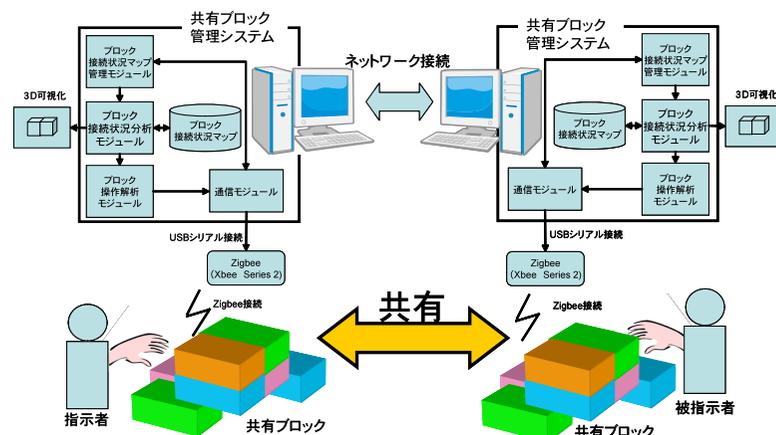


図7 システム構成図

### 5.1 システムの動作

#### 5.1.1 リアルタイム組み立て共有作業モードにおけるシステムの動作

指示者がブロックを着脱した場合のシステムの動作は以下のようになる。

- (1) 指示側のブロックが着脱を感知し Zigbee を経由して指示側の共有ブロック管理システムに報告する。
- (2) 報告を受けた共有ブロック管理システムは管理下にあるブロックとネゴシエーシ

ョンを行い、指示側のブロック接続状況マップを更新する。

- (3) 更新されたブロック接続状況マップを被指示側の管理システムに送信する。
- (4) ブロック接続状況マップを受信した被指示側の共有ブロック管理システムは、管理下にある共有ブロックのブロック接続状況マップとこれを比較解析し、どの共有ブロックのどの LED を点灯させるかを決定し、被指示者の共有ブロックに送信する。
- (5) 被指示者の共有ブロックの LED の点灯指示により被指示側のユーザがブロックを着脱する。
- (6) その着脱を感知したブロックが管理システムに接続状況を報告する。
- (7) その着脱が正解か不正解かを共有ブロック管理システムが判別し正解音、不正解音を再生する。
- (8) 正解の場合、LED の消灯指示をブロックに送り、その後、両者の共有ブロック管理システムは次のユーザの作業を待つ待機状態になる。

#### 5.1.2 リアルタイム形状共有、非同期形状共有作業モードにおけるシステムの動作

前節の(1)～(2)が繰り返し行われたのち、(3)が行われる。作業モードにあわせて、任意の時点で(4)～(8)が繰り返し行われる。

### 5.2 共有ブロック

共有ブロックの全景は図1に示した通りである。外側は、大きめのサイズ(約10cm×5cm×4cm)の市販の玩具ブロックを使用している。内側は基板等を内蔵するために、ささえ板等を削ってあるが強度的には問題はない。内部には、1チップコンピュータ(Microchip Technology社製 PIC16F887 TQFP 44Pin)、Zigbeeを用いた短距離無線通信チップ(XBee Series 2)、作業提示用の8個の2色LED(赤、緑、および同時点灯によるオレンジの3色が表現可能)、およびバッテリーとして単5電池2本を搭載しており、重量は約80gである。現時点では、2地点での作業を想定し、それぞれ6個、全体で12個の共有ブロックを作成した。

#### 5.2.1 電極配置

ブロックの着脱を物理的に認識するために、アンダーピンとローピンには図8、9のような銅箔テープを使用した電極がつけられており、これらが接触、分離することにより、ハードウェア的に着脱を認識する。また、ピン番号を把握するために接続された電極上でTTLレベルでのネゴシエーション(5.4参照)が行われる。

電極には、GNDと信号用の2種類があり、それぞれが各ピンごとに接続される必要がある。しかし、ブロックは図3、4の様に90度毎のどの向きからでも接続されるため、図7の様のように2種類の電極を45度ごとに8ヶ所配置することにより対応した。この配置によりどの方向から接続されても、GNDと信号用接点が正確に接続される。また、銅箔テープの幅を十分狭くすることにより、ブロック同士を90度以外のねじれた位置から接続しても、非接触になるだけで、ショートや逆接続は生じない構造となっている。

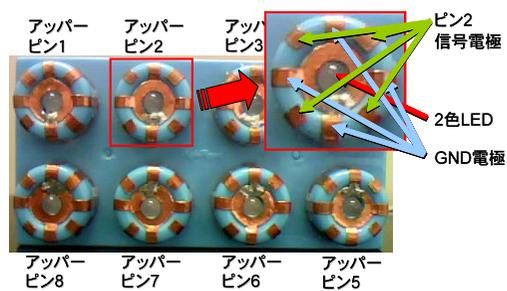


図 8 アッパーピンの電極と 2 色 LED の配置

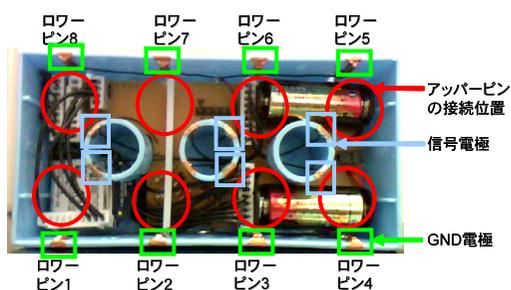


図 9 ローピンの電極配置

### 5.2.2 ブロック接続状況の把握

ブロック接続状況マップを作成するためには、ピンの着脱の感知に加え、各ピンごとに、相手のブロック ID とピン番号を取得しなければならない。そのためには接続されたピン上でデータ通信による実現が考えられる。しかし、RS232C を利用した場合は送信、受信、GND の 3 種類の電極が必要になる。I2C 等を用いれば 2 種類の電極で通信が可能になるが、ブロックの着脱が頻繁に行われる場合、バスの調停が困難になる。それ以上に、これらのデータ通信を用いる場合はリソース不足が最大の問題となる。

アンダーピンとローピンの 16 ピンすなわち 16 チャンネル全てにおいて、データ通信を管理し、データを取りこぼしなく送受信するためには、かなりの CPU リソースが必要となるだけでなく、常に全チャンネルを見張り続けるため消費電流も大きいものとなる。

そこで、PIC のプログラマブルな入力、出力ピン設定、内蔵プルアップ抵抗、および、入力ピンのハードウェア割り込みを用いることで、共有ブロック本体では、TTL

ロジックレベルでの HI, LOW をハードウェア割り込みだけで監視し、ピンの対応関係は共有ブロック管理システムとの通信により共有ブロック管理システム側で把握することとした。接続状況把握アルゴリズムについては 5.4 で述べる。これによりブロック本体の CPU を Sleep 状態で待機させることが可能となり最小限のリソースで実装が可能となる。現バージョンのブロックでは単 5 電池 2 本 (直列 3V) で 4 日程度の連続動作が可能である。

### 5.2.3 LED の点灯を用いた操作提示

LED は、PIC の入出力ピンで LED マトリクスを組むことにより、直接ドライブしている。共有ブロック管理システムからのコマンドに基づき、点灯、点滅、およびそれぞれの発光色を制御している。点滅は PIC 本体のタイマ割り込みを用いており、間隔で点滅間隔はおよそ 1 秒である。

### 5.2.4 共有ブロック管理システムとの通信

共有ブロックは Zigbee により共有ブロック管理システムとの通信を行う。共有ブロック管理システム側が Coordinator となり PAN を開始し、その後共有ブロック側が Router として PAN に参加することにより、全共有ブロックが共有ブロック管理システムの管理下に入ることになる。共有ブロック内では、PIC16F887 と XBee Series 2 が 9600bps のシリアルで接続されている。

アプリケーションレベルでは、LED の点灯、点滅、消灯指示、および、接続状況の報告、問い合わせのコマンドプロトコルが実装されている。また、通信についても割り込みを利用した、スリープコントロールが行われている。

## 5.3 共有ブロック管理システム

共有ブロック管理システムは PC (Windows XP SP3, InterCoreDuo2 1.8G, 4Gbyte RAM 上) で動作し、USB シリアル変換ケーブルで接続された Zigbee モジュール (XBee Series 2, Coordinator モード) を介して、管理下にある共有ブロックと通信を行う。管理システムは、Java SE6 を用いて実装した以下の 4 個のモジュールからなる。

### 5.3.1 通信モジュール

USB シリアルを介して接続された Zigbee モジュールとの通信および送受信コマンドのパケット変換を行うモジュールである。シリアル通信には、Java Communication API に準拠したオープンソースクラスライブラリの RXTX を用いている。

### 5.3.2 ブロック接続状況マップ管理モジュール

各共有ブロックと、5.4 で述べるプロトコルに基づいた通信を行い、構築中の作業対象物のブロック接続状況マップを管理更新するモジュールである。

### 5.3.3 ブロック接続状況分析モジュール

本モジュールには 2 つの機能がある。1 つは、ネットワークを介して相手側の共有ブロック管理システムと通信を行い互いのブロック接続状況マップの送受信を行うブロック接続状況マップ同期機能である。非同期形状共有作業モードにおいては、相手

側のブロック接続状況マップのファイルへの保存も行う。もう一つはブロック接続状況マップを分析し、現在のモデリング形状を3Dで可視化しユーザに提示するブロック接続状況マップ3D可視化機能を持つ。本機能は4.3で述べた、非同期形状共有作業モードにおいて記録されたブロック接続状況マップに基づく形状確認のための補助機能である。現時点では、単なる可視化機能しか有しないが、形状をユーザがエディットするための3D形状エディット機能を実装する予定である。3D可視化機能は、Java 3D API を用いて実装されている。

### 5.3.4 ブロック操作解析モジュール

本モジュールは、ブロック接続状況マップを解析し、組み立てユーザに対して提示するLEDの点灯パターンを構成する機能を持つモジュールである。リアルタイム組み立て共有作業モード、およびリアルタイム形状共有作業モードにおいては、相手側と自分側のブロック接続状況マップの差分からのLED点灯パターンを構成する。非同期形状共有作業モードにおいてはブロック接続状況分析モジュールがファイルに保存したブロック接続状況マップを解析しLED点灯パターンを構成し再生する。

## 5.4 接続状況把握アルゴリズム

### 5.4.1 ブロック接続時

図10~13において、右が、はめられる側のブロック（ブロックID:1）下部のローワーピンで、左が、はめる側のブロック（ブロックID:2）上部のアッパーピンである。

(1) 接続前の初期状態では、ローワーピンは全ピンを入力モードにし、さらに内部的にウイークプルアップ状態に設定されている。そのため、ローワーピンは全ピンHIレベル入力になっている。アッパーピンも全ピンを入力モードに設定してあり、また、抵抗を用いてプルダウンしてあるため、アッパーピンは全ピンLOWレベル入力になっている。

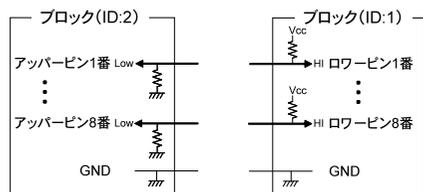


図10 初期状態

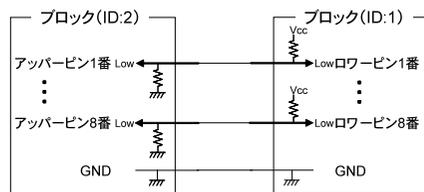


図11 接続状態

(2) 物理的にブロックが接続されると、GNDと信号ピンがそれぞれ接続される。図11では、ブロックの形状的に実際にはありえないが、例として、ブロックID:1のローワーピン、1、8番とブロックID:2のアッパーピン1、8番、およびGNDのみがそれぞれ接続されたものとする。

(3) これにより、アッパーピンがプルダウンされているので、ローワーピンの1、8番

ピンがLOWレベルになり、ブロックID:1で割り込みが発生する。これにより、ブロックID:1のCPUが稼働状態になり、Zigbee経由で管理システムに、自分のID:1とローワーピン1、8番に接続があったことを通知する。この時点では、ローワーピンの1、8番ピンに「接続があった」ことしか判明せず、相手のIDとピン番号は不明である。また、ブロックID:2はなにも感知できないのでSleep状態のままである。

(4) ブロックID:1から通知を受けた管理システムは、ブロックID:1に対して、まず、変更のあったローワーピン1番にモードを変更するようにZigbee経由でコマンドを送信する。

(5) モード変更コマンドを受信したブロックID:1は、ローワーピン1番だけを一瞬だけ出力モードに変更（図12）しHIを出力し、通常モードに戻る。

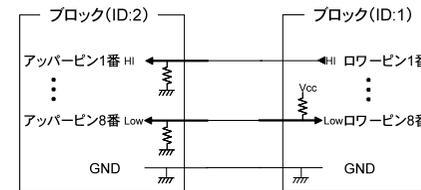


図12 モード変更状態

(6) これにより、ブロックID:2のアッパーピン1番がHIレベルになり、ブロックID:2で割り込みが発生しブロックID:2のCPUが稼働状態になり、Zigbee経由で管理システムに、自分のID:2とアッパーピン1番に接続があったことを通知する。

以上のやり取りによって、管理システムはブロックID:1のローワーピン1番とブロックID:2のアッパーピン1番が接続されたことを把握することができる。このやり取りを(2)で通知された他のピン（例では8番）にも行うことによりブロックID:1に接続された全てのブロックのIDとピン番号を取得することができ、ブロック間の接続状況を把握することができる。

### 5.4.2 ブロック分離時

前節で述べたブロック接続時のやり取りが全て終了すると、図11の状態となる。この状態でブロックを分離すると、全ピンが切り離され図10の初期状態に戻る。すなわちブロックID:1のローワーピン1、8番がHIレベルになるため、割り込みが発生しブロックID:1はローワーピン1、8番が切り離されたことを感知できる。そこで、管理システムに自分のID:1とローワーピン1、8番が切り離されたことを通知する。ブロックID:2はなにも感知できないが、管理システムはブロックID:1の切り離し情報に基づき、ブロックID:2のブロック接続状況マップも変更することができるので、ブロック間の分離状況を把握することができる。

## 6. 評価

現在、以下の評価実験の分析を行っている最中であるため概要のみを述べる。

### 6.1 モデリング機能の評価

被験者に、課題、および自由組み立てを行わせ、モデリングエラー率と、モデリング認識時間を測定する。

#### 6.1.1 モデリングエラー率

利用初期には、ブロックの差込みが甘い、斜めに差込む、といった操作があり、エラーが生じやすいが、操作に慣れてくるとエラー率はほぼ0となる。ただ、物理的接点を用いているため、チャタリングが発生し接続操作が完了する前に共有ブロックからの接続報告が共有ブロック管理システムに送信されることがあったが、ブロック接続時にガードタイムを設けることにより、解決を行った。

#### 6.1.2 モデリング認識時間

本システムでは5.4で述べた処理が各ブロックで非同期的に行われる。そのため、ベースブロックからの探索を行うシステムのように作業対象物の接続ブロック数に認識時間が比例することはなく、一度に接続されるピンの数にほぼ比例した認識時間となる。現在のところ、前節で述べたガードタイムを用いても、1秒以下での認識が可能である。

### 6.2 操作提示機能の評価

操作提示機能の有効性を評価するために、音声と作業空間を写すカメラ映像を用いた手法（Skypeを使用）と本システムの比較実験を行った。実験者が指示者となり、被験者10人を被指示者とし、6個のブロックを用いたブロック組み立て課題を行い、課題達成時間、エラー率を計測した。

音声と作業空間を写すカメラ映像を用いた手法に比べ、課題達成時間は24%、特にブロック操作の理解に関しては36%程度短縮された。

## 7. まとめ

自由な形状の作業対象物を完全な同一の実物体として共有可能な対称的作業空間の実現を目的とした、共有ブロックを用いた遠隔地作業支援システムを提案した。具体的には、作業対象物を構築可能な部品を双方に用意し、その部品に自ら利用者の組み立てを感知し、遠隔地の部品を通じて直感的にユーザに組み立て方を提示するインテリジェント性を持たせることにより、作業対象物および作業対象への操作の共有を実現し、対称的な作業空間の共有を実現した。現在のシステムでは、通常形状のブロックしか実装していないため、対応している作業はブロックの着脱のみである。今後、可動機構（車輪のような回転動作や、関節のような開閉動作）を持つブロックを実装することにより、可動部の変形作業の共有を可能とする予定である。また、作業対象物

の重心移動機構を実現し、作業対象物全体をユーザが移動、回転させるような作業の共有の実現も行う予定である。

## 参考文献

- 1) 酒田信親, 蔵田武志, 葛岡英明: レーザポインタと装着型ディスプレイを用いた遠隔協調作業のための視覚的アシスト, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.4 pp. 561-568 (2006).
- 2) 玉木秀和, 山本峻, 岡嶋雄, 坂内祐一, 岡田謙一: MR空間における準同期的な実物体共有による遠隔作業支援, 日本VR学会論文誌, Vol.12, No.4 pp. 529-536 (2007).
- 3) 南谷真哉, 北原格, 亀田能成, 大田友一: 遠隔地における複合現実空間の共有: 対面型卓上作業システムの構築, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2007-53, pp. 91-96, (2007).
- 4) S. Wesugi, Y. Miwa: Facilitating interconnectedness between body and space for full-bodied presence-Utilization of Video projection "Lazy Susan" communication system, Workshop on Presence (Presence 2004), pp208-215 (2004).
- 5) 磯和之, 八木貴史, 小林稔, 岩城敏, 石橋聡: 生活融合通信: 空間情報整合化機能, "ComAdapter", 日本VR学会論文誌, Vol.9, No.2 pp. 169-178 (2004).
- 6) 坂内祐一, 玉木秀和, 鈴木雄士, 重野寛, 岡田謙一: 実物体を用いたMR空間での遠隔協調作業, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.7 pp. 2465-2476 (2007).
- 7) 宮狭和夫, 坂内祐一, 鈴木雄士, 玉木秀和, 重野寛, 岡田謙一: MR空間における仮想シールを介したシンタクスの異なる実物体の遠隔共有手法, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.1 pp. 134-147(2007).
- 8) 渡邊亮一, 伊藤雄一, 北村喜文, 岸野文郎, 菊池日出男: マルチメディアコンテンツのための分散制御によるActiveCubeシステムの高速度化, 日本VR学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 513-522 (2005).
- 9) 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).
- 10) D.Anderson, J.Frankel, J.Marks, A.Agarwala, P. Beardsley, J. Hodgins, D. Leigh, K. Ryall, E. Sullivan, and J. Yedidia. Tangible interaction + graphical interpretation: a new approach to 3D modeling, in Proc. of SIGGRAPH2000, pp. 393-402 (2000).
- 11) M. G. Gorbet, M. Orth and H. Ishii. Triangles : tangible interface for manipulation and exploration of digital information topography, in Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems(CHI' 98), pp. 49-56 (1998).
- 12) 鈴木栄幸, 加藤浩: アルゴブロック: アルゴリズム教育のための物理言語, 第8回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 245-248 (1992).