

指向性通信で構成したアドホック・ネットワークの幾何学的な情報に基づくプロトコルの研究

代表研究者	高井博之	広島市立大学	大学院	情報科学研究科	助教
共同研究者	角田良明	広島市立大学	大学院	情報科学研究科	教授
共同研究者	大田知行	広島市立大学	大学院	情報科学研究科	准教授
共同研究者	井上伸二	広島市立大学	大学院	情報科学研究科	助教
共同研究者	河野英太郎	広島市立大学	大学院	情報科学研究科	助教
共同研究者	岩城敏	広島市立大学	大学院	情報科学研究科	教授
共同研究者	橘啓八郎	大阪学院大学	大学院	コンピュータサイエンス研究科	教授

1 概要

通信媒体に指向性の強い赤外線を用いた複数の移動ロボット間の相互通信を考えると、ロボットの位置関係によって通信障害の起きにくいロボットと起きやすいロボットが現れる。この現象は、指向性通信媒体の送受信ビーム幅やロボットの位置関係（即ち、ノードの配置）など通信網の幾何学的な性質によるものと考えられる。そこで本研究では、この現象を、移動ロボット間の相互通信によって自律的に構築されるアドホック・ネットワークの送受信制御や伝送経路選択に活かすことを考えた。この現象の詳細を把握し、効果的に活用するため、以下の項目について実施した。

- 1) 指向性移動通信網の模擬環境の構築
 - 2) 幾何学的な指向性通信の制御手順の開発
 - 3) 動的な通信網上の通信制御手順の開発
- 実施したこれらの項目の経過と成果について述べる。

2 はじめに

複数の知能ロボットによる共同作業は、複雑で不安定な作業環境でも対応可能と考えられ、災害時の復旧支援活動や大規模な産業設備の保守点検作業など広範で多岐にわたる活動が期待されている。しかしながら、それらのロボットは互いに協調を図らなければ、ロボット同士の衝突やセンサに干渉を生じて円滑なタスクの遂行に支障をきたす。これらのロボットが円滑にタスクを遂行するためには、ロボット間で共通した通信方式を用い、相互に獲得した情報を交換する必要がある。

ロボット相互の通信は、ロボット同士の相互中継で自律的に通信網を構築することによって、作業環境にあらかじめ設置されている基盤設備（いわゆる無線 LAN のアクセスポイントや携帯電話の基地局などのインフラストラクチャ）に頼らず基盤設備が無い場所（即ち、被災により基盤設備が使えない場所や基盤設備の事前設置が困難な場所）でのタスク遂行を可能にする。ここで、ロボット同士の相互中継で構築された通信網は、タスクの進行によって時々刻々形状を変えるアドホック・ネットワークである。

一般的に、アドホック・ネットワークには通信網を集中管理する機構が存在しない。そのためノード数の増加に伴って混信が増加し、通信効率が下がる問題が知られている。不要な信号を排除して混信を減らし、通信効率を向上させる方法として、指向性通信を用いたアドホック・ネットワークの研究が進められている。指向性通信では、ノードの配置の幾何学的な性質の影響を受け、混信の発生頻度が変わる。この混信は1台の受信ノードと最低2台の送信ノードの少なくとも計3台のノードが関与している。この混信を生じた3台のノードについて、受信ノードを一方の端点とする通信リンクのなす角度に注目した。三角形の幾何学的な性質から、各ノードの受信範囲を 60° 以下に制限したとき、3台のノードのうち、少なくとも1台は通信リンクのなす角度が 60° 以上となり混信を生じない。しかしながら、ノードの受信範囲を 60° に制限した場合、ロボットの互いの移動や回転によって受信範囲を外れ、通信途絶が起きる。そこで我々は、指向性の強い赤外線を通信媒体に用い、図1のように受信範囲を 60° に制限した受信装置8台をロボットの胴周りの円周上に配置して、混信の減殺と通信途絶の解消を両立できる空間分割型光通信システムを考案した。

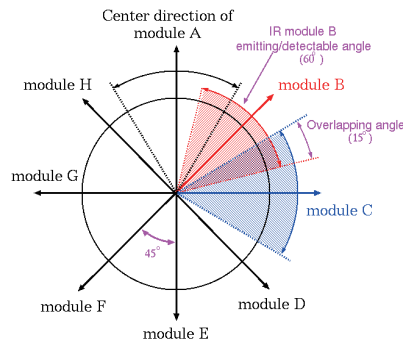


図1 空間分割型光通信システムの受信器の配置と受信範囲

本研究では、先に考案した空間分割型光通信システムを実現する方法の検討と同時に、考案した通信システムを用いて構築した通信網の性能や特性を推定するための指向性移動通信網の模擬環境の構築、考案した通信システムの特徴を活かすための幾何学的な指向性通信の制御手順の開発、ロボットの移動に伴うネットワーク形状の変化に対応可能な動的な通信網上の通信制御手順の開発を行った。

3 指向性移動通信網の模擬環境の構築

我々は、考案した空間分割光通信システムを用いて通信網を構築したとき、この通信網が持つ特性や性能を推定するため、指向性移動通信網の模擬環境の構築を行った。通信網模擬環境の構築には、広く通信網の模擬に利用されている Network Simulator version 2 : NS-2 (<http://isi.edu/nsnam/ns/>)を用いた。

NS-2は、プログラムのすべてが無償で公開されており、数多くの有線通信網や指向性を持たない無線LAN通信網の研究に用いられた実績がある。しかしながら、NS-2の標準機能には指向性アンテナ模擬機能やノード間角度検出機能、赤外線信号伝播モデルなど、考案した空間分割光通信システムを模擬するために必要な幾つかの機能が実装されていない。そこで、NS-2のプログラムに変更を加え、指向性アンテナ模擬機能と、ノード間角度検出機能の追加を行った。

3-1 指向性アンテナ模擬機能

指向性通信では、送信アンテナのビームと受信アンテナのビームが互いに向かい合うとき、最も通信効率がよく、ビームの向きが外れるに従って通信効率が悪くなる。この性質を利用して、指向性通信では意図しないノードからの信号を排除し、混信を減らすことができる。

受信ノードに全方位性アンテナを、送信ノードに指向性アンテナを載せ、送信ノードをその場で 360° 回転させたときの受信信号強度を求めた。図2にNS-2に組み込んだ指向性アンテナ模擬機能の動作結果を示す。図2から、同じ送信電力でもアンテナのビームを絞込んだ方が、意図した方向への信号強度が大きくなり、意図しない方向からの信号を排除できることが判る。

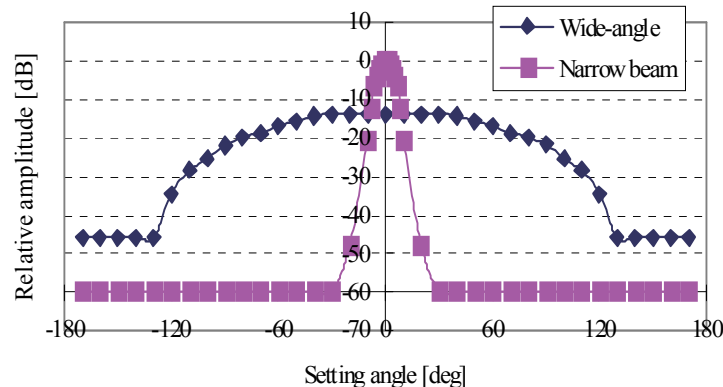


図2 指向性アンテナ模擬機能の動作結果

3-2 ノード間角度検出機能

我々は、指向性通信では、ノードの配置の幾何学的な性質の影響を受け、混信の発生頻度が変わることに着目し、空間分割型光通信システムを考案した。混信には少なくとも3台のノードが関与することから、考案した空間分割型光通信システムを用いて構築した通信網において、3台のノードが作る三角形の幾何学的性質を利用した混信の減殺を検討した。

三角形の内角の総和は 180° で一定である。このことから、三角形を構成するあるノードを端点とする通信リンクのなす角が 60° より小さければ、三角形の中に通信リンクのなす角が 60° より大きいノードが少なくとも1つは存在する。そこで、各ノードで通信リンクのなす角を計測し、図3のように通信リンクのなす角が最大のノードが調停ノード Arbiter (アービタ) となつて、通信リンクの送受信制御を行い、混信を減殺する方式を考案した。

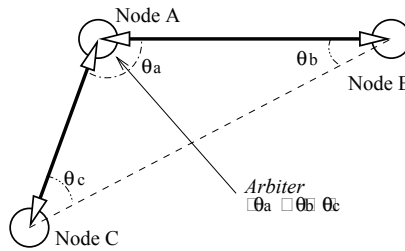


図3 通信リンクのなす角に基づく Arbiter の決定

指向性アンテナ模擬機能と同様、NS-2にノードの配置情報から通信リンクのなす角を求めるノード間角度検出機能と、Arbiter 決定機能を追加した。これら追加機能を用いて4台のノードで構築した小規模な通信網で生じる混信のシミュレーションを行った。図4に比較する4種類の通信網を示す。この4種類は、(a)単一チャンネルの全方位性送信(Omni)、(b)単一チャンネル指向性送信(SCDT)、(c)複数チャンネル指向性並行送信(MCDT)、(d)Arbiter に迂回した複数チャンネル指向性並行送信(Arbiter)である。表1に比較結果を示す。

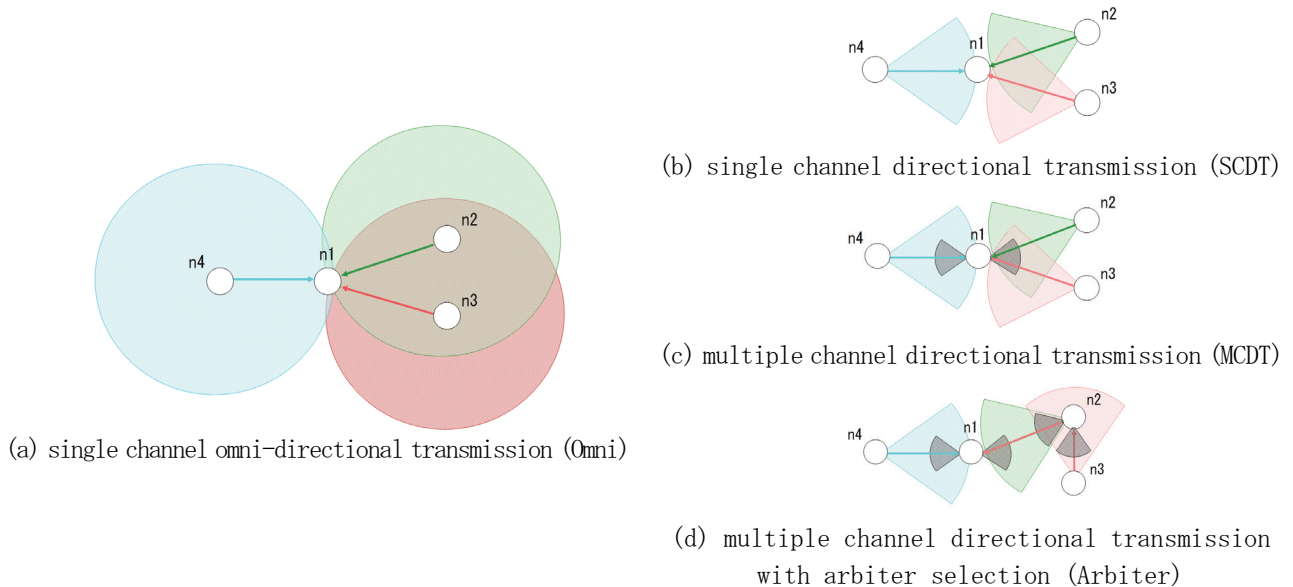


図4 4台のノードで構築した小規模な通信網のモデル

表1 小規模な通信網モデルにおける混信減殺効果の比較

Type	Theoretical Maximum	Simulation result	Effectiveness
Omni	1048576	771120	73.5%
SCDT	1048576	1003680	95.7%
MCDT	2097152	2048160	97.7%
Arbiter	3145728	3078360	97.9%

表1から、単一チャンネル全方位性送信(Omni)では、理論的な伝送許容量に比べて26.5%の損失を生じ

ており、単一チャネル指向性送信(SCDT)と比較することで、その多くが混信によるものであることが判る。また、単一チャネル指向性送信(SCDT)と複数チャネル指向性並行送信(MCDT)、Arbiter に迂回した複数チャネル指向性並行送信(Arbiter)を比較すると、全体的な伝送許容量だけでなく通信効率もわずかながら向上しており、Arbiter を導入した通信制御プロトコルや経路制御プロトコルによって、さらなる伝送許容量や通信効率の向上を見込むことができる。

4 幾何学的な指向性通信の制御手順の開発

これまでの検討から、指向性通信では送信するタイミングや方向を調整することで、混信を減らすことができることが判った。そこで、この性質を利用した指向性通信の制御手順の開発に取り組んだ。

4-1 空間光通信のためのデータ伝送方式の検討

従来から無線データ通信には電波が多く用いられている。無線データ通信には数十MHz から数GHz の周波数帯の電波を用いることが多い。これは、位相の揃った電波を容易に扱うことができ、指定された周波数の電波の有無だけでなく位相の変化を利用してデータを表現できるので、単位時間当たりに伝送できるデータ量を変調を用いて増やすことが可能である。しかし、無線データ通信に用いられる電波の周波数帯は波長が長く、指向性通信を行うためにはアンテナが大型になり、小型の移動ロボットなどに実装することが難しい。そこで本研究では、容易に指向性通信を実験するために、赤外線通信媒体として用いる光通信方式を検討した。赤外線通信では光源としてLD(レーザ・ダイオード:Laser Diode)やLED(Light Emission Diode)を用いる。LDが出力するレーザ光は大出力を得ることが難しいものの、位相の揃ったレーザ光が得られる。しかし、レーザ光は眼に入った場合、視覚に障害を与える可能性がある。一方、LEDを光源とした場合、大出力が得られるものの光の有無だけでデータを表現する必要がある。本研究では、視覚に対する安全性に配慮して、LEDを光源に用いる赤外線通信を検討した。

LEDを光源に用いる赤外線通信では、周波数・波長や位相を操作できないので、光の有無でデータを表現するOOK(On Off Keying)でデータを伝送する。しかしながら単純なOOKではスイッチのONかOFFの2通りしか表現できない。そこで、単位時間毎に光を明滅させて複雑なデータを伝送する方式が考えられている。光の明滅でデータと時間基準信号=クロックを同時に送る符号化方式としては、HDLCのbit stuffingやCMI(Code Mark Inversion)、Manchester-Code、8B10B符号などがある。

HDLCでは、状態1が6ビット続く符号“01111110”をFlag Sequenceと呼び、データのひと纏り=Frameの最初や最後を示す特殊符号として扱う。そのため送信するデータ中に“0111111x”が現れた場合は、状態1が5ビット続いた後に“0”を挿入し“011111101x”の9ビットのデータとして送信する。また受信データに“011111101x”が現れた場合は、状態1が5ビット続いた後の“0”を削除しデータ“0111111x”に復元する。この操作をbit stuffingと呼ぶ。

8B10B符号では、8ビットのデータを5ビットと3ビットに分け、それぞれを6ビットと4ビットの符号に変換する。符号化手法として状態0や状態1が5ビット以上連続しないような符号が選ばれている。また、データ中に状態0や状態1が10ビット中に6ビット存在する場合は、状態0と状態1を反転させてデータ中の状態0と状態1がほぼ同数になるよう符号化される。また、8B10B符号には12種類の通信制御用符号が用意されている。これらはHDLCのFlag Sequenceのようにデータの区切りを示すことに使えるほか、ロボット同士の同期や緊急停止など伝送されたデータの内容分析を待たずに指示を伝えることができる。

表2に一般的なシリアル・データ伝送方式の調歩同期式とHDLCのbit stuffing、8B10B符号の比較を示す。

表2 シリアル・データ伝送方式の比較

	1バイト長	クロックの伝送	通信制御符号	データ伝送単位
調歩同期式	固定長	不可	なし	バイト
HDLCのbit stuffing	可変長	可	2種類	Frame
8B10B符号	固定長	可	12種類	バイト/Frame

本研究では、表2での比較の結果、時分割による送受信制御や通信制御符号を使ったロボット同士の同期など、移動ロボットの相互通信に適した機能を有する8B10B符号をデータ伝送方式に用いることにした。

4-2 空間光通信のためのデータ送受信制御方式の検討

赤外線を通信媒体として用いるデータ伝送方式の検討に続いて、空間光通信のためのデータ送受信制御方式について検討を行った。無線データ通信方式として、一組の通信機が送信と受信に異なる通信チャネルを用い同時に送信と受信を行う全二重式と、一組の通信機が送信と受信に同じ通信チャネルを用い互いに送信と受信を切り替えて行う半二重式がある。赤外線を通信媒体とする空間光通信では、一組の通信機が複数の通信チャネルを得ることが困難なので、半二重式データ送受信制御を用いる。

半二重式データ送受信制御では、通信媒体の状態を検知し通信チャネルの空き時間を見計らってデータの送信を開始する Carrier Sense 型と、通信チャネルの使用時間に区切りを設定しノード毎にデータ送信時間を割り当てる時分割型の2種類が使われる。

(1) Carrier Sense 型のデータ送受信制御方式^[1-3]

無線データ通信は、1970年頃にハワイ大学で開発された Aloha ネットワークに遡る。Aloha ネットワークでは、送信ノードは好きなときに送信を開始し、送信後は受信ノードからの応答(A C K: Acknowledge)を待つ。受信ノードからの応答がない場合は混信が発生したものと待機(back off)時間経過後に先のデータを再送信する極めて単純なプロトコルである。このため Aloha ネットワークではチャネルのトラフィックの増大に対して混信の発生も増加し、通信効率が悪化する欠点を有していた。

混信を避ける一つの方法として、送信の前に搬送波の有無を確認する(listen before talk) 手続きによって搬送波検知(Carrier Sense)を行い、他のノードが送信中でないことを確認したのち送信するC S M A (Carrier Sense Multiple Access)が考案された。このC S M A方式は、有線無線を問わず複数のノードが共通のチャネルを用いるネットワークにおいて広く用いられている。C S M A方式の著名なものとして、有線の Ethernet に用いられているC S M A / C D (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detect)がある。Ethernet では一本の有線チャネルに複数のノードが繋がり、搬送波検知(Carrier Sense)によって有線チャネルの空きを見計らって通信を開始する。複数のノードが同じタイミングで通信を開始したとき、有線チャネルの電位の変化から混信検知(Collision Detect)が行われ、それぞれのノードは指定された待機時間の待ち合わせを行い、再び搬送波検知で有線チャネルの空きを確認したのち通信を開始する。

C S M A / C Dを使う有線のネットワークでは、チャネルの電位の変化から送信ノードでも混信を検知することができる。しかし無線では送信中は同じチャネルに対して受信することができないので、受信ノード以外は混信を検知することができない。そこで無線のネットワークでは混信に係るノードの間で“チャネルの利用権”を交換し混信を回避するC S M A / C A (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)方式が考案された。このC S M A / C A方式は、現在の無線L A Nの主流である I E E E 802.11 規格に採用されている。

C S M A / C Aでは、送信ノードがチャネルの空きを見計らい送信要求(R T S: Request To Send)を送り、チャネルを使うことを周囲のノードに知らせる。R T Sを受け取った受信ノードは送信許可(C T S: Clear To Send)を送る。そしてC T Sを受け取った送信ノードがデータの送信を開始する。データを受け取り終わった受信ノードは通信成功(A C K: Acknowledge)または通信失敗(N A K: Negative Acknowledge)を送り、チャネルが空いたことを周囲に知らせ、一通りの通信が終了する。

無線データ通信では、総てのノードに信号が届くとは限らない。そのためC S M A / C Aなどの混信に考慮したデータ送受信制御方式であっても、完全に混信を無くすことはできない。このとき起こる混信は「さらし端末問題」や「隠れ端末問題」と呼ばれている。図5にC S M A / C Aにおける混信発生モデルを示す。

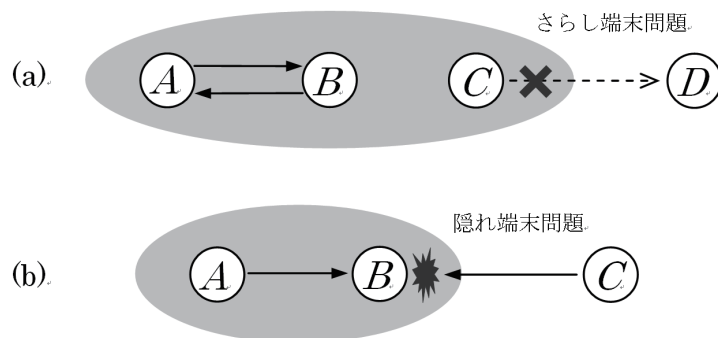


図5 Carrier Sense 型データ送受信制御における混信発生モデル

さらし端末問題 図5(a)のようにノードA、B、Cはそれぞれが通信可能な範囲内に、ノードDがAB間の信号が届かない場所にあり、AB間で通信している。ここで、CD間で通信を行う場合、ノードCはAB間の信号を検知してしまうため信号の送信が行えず、ノードDと通信を開始できない。この結果、通信帯域幅の無駄を生じ、ネットワーク全体のスループットを低下させる。この障害をさらし端末問題という。

隠れ端末問題 図5(b)のように3つのノードA、B、Cがあり、AB間、BC間は直接通信できるがAC間は信号が届かない距離にあるとする。この場合、ノードAからノードBに信号を送信していても、ノードCではノードAからの信号を検知できない。そのため、ノードCがノードBに向けて信号を誤送信してしまい、混信を起こす可能性がある。この障害を隠れ端末問題という。一般に、混信が起こった場合には、受信できなかったデータは再送信する必要があるため、ネットワークのスループットが低下する。

これら、さらし端末問題や隠れ端末問題を生じる一つの要因は、信号を全方位に送信することにある。故に、指向性通信を用い意図した相手の方向とだけ通信する場合は、混信が減りネットワークのスループットを向上できる可能性がある。これは前述3章3-2節の図4と表1からも判る。

(2) 時分割型のデータ送受信制御方式

前述のAlohaネットワークに用いられたPure-Alohaプロトコルでは、各ノードが勝手なタイミングで送信したため、送信データの一部で混信しても全送信データを再送する必要があり、スループットを低下させていた。スループットを向上する方策として、全ノードに共通する時間的な区切り(Time Slot)を設け、区切りに合わせてデータを送信するSlotted-Alohaプロトコルが考案された。Slotted-Alohaプロトコルでは、混信を生じたTime Slotの送信データだけを再送すればよいのでPure-Alohaプロトコルに比べてスループットの向上を見込むことができる。しかし、Slotted-Alohaプロトコルでは各ノードは好きなTime Slotで送信でき、積極的な混信対策は採られていない。

ネットワーク上のノード数の増減や各ノードが送信するデータ量の増減に対応すると同時に混信を減らしてスループットを向上する方式として、複数のTime Slotをひとまとまりとして扱い、各ノードが送信するTime Slotを予約することで混信を避けるReservation-Alohaプロトコルなどが考案されている。Reservation-Alohaプロトコルでは、ノード数が少ない場合にはSlotted-Alohaプロトコルに類似した動作でデータ量の多いノードが複数のTime Slotを確保してデータ伝送時間の短縮を行い、ノード数が増えた場合には事前割り当て型TDMA(Time Division Multiple Access)のようにできる限り均等なTime Slot割り当てが行える。

すべての時分割型のデータ送受信制御方式に共通する課題として、基準時間の決定方法とTime Slotの効率的な割り当て方法がある。TDMAを代表とする多くの時分割型のデータ送受信制御方式では、集中管理型のネットワーク管理機構を採用しており、基準時間の決定やTime Slotの割り当ては集中管理ノードに委ねられている。しかしながら集中管理型のネットワーク管理機構を持たないアドホック・ネットワークでは、どのノードが基準時間を決定しTime Slotの割り当てを行うのか決まっていない。本研究では、3章3-2節ノード間角度検出機能に述べたように、局所的な調停ノード:アービタ(Arbiter)を自律的に決定し、一時的なネットワーク管理ノードとして、ネットワークの基準時間の決定やTime Slotの割り当てを行う方式について考案した。

5 動的な通信網上の通信制御手順の開発

本研究では、移動ロボット間の相互通信を想定した、空間分割型光通信システムにおける通信制御手順を開発している。移動ロボット間の相互通信で構築されるネットワークは、ロボットがタスク遂行のために時々刻々と位置を変えるため、トポロジーが時々刻々変化するアドホック・ネットワークである。空間光通信のための通信制御手順として、4章4-2節に述べたように、Carrier Sense型と時分割型の2種類を検討した。この2種類の方式を、移動ロボットに搭載した空間分割型光通信で構築したアドホック・ネットワークに適用する方法について検討した。

5-1 動的な通信網における空間分割型Carrier Sense通信制御方式の検討

一般的なCarrier Sense型の通信制御方式では、全方位に信号を送信していたため、隠れ端末問題やさらし端末問題を生じ通信効率を低下させていた。本研究では、指向性通信を用い、通信相手の方向にだけ信号を送信するので、隠れ端末問題やさらし端末問題の発生を抑え、通信効率を向上させる方式について検討した。

指向性通信を用いるCarrier Sense型通信制御プロトコルの代表的なものにD-MAC^[5]やCDR-MAC^[6]がある。

D-MAC(Directional MAC)は、Koらが提案した、IEEE 802.11を拡張した指向性MACプロトコルで、データの送信に指向性ビームを用いて通信効率を向上させる。しかしD-MACは各ノードの位置関係が既知であることを前提にしたテーブル駆動方式であるため、頻りに位置を変える移動ロボット間の通信には適さない。また、GPSを用いたノード位置情報の取得を前提にしている。

一方、Korakisらが提案したCDR-MAC(Circular Directional RTS MAC)は、通信相手ノードの位置を信号の入射角情報を用いてオンデマンドに取得する。したがってGPS等は不要で、通信中のノードが移動する状況にも対応できる。しかし混信が発生した際の対処については考慮されていない。

これら先行研究の結果を踏まえ、開発中の空間分割型光通信システムに適した通信制御方式を検討した。この光通信システムは受光素子に光入射角センサを用いており、図6に示す光入射角検出機能によって通信相手ノードの位置をオンデマンドに検出できる。また、すべての発光素子・受光素子は独立して発光・受光できるので、図7のように混信を生じない複数の方向に対して並行送信ができる。

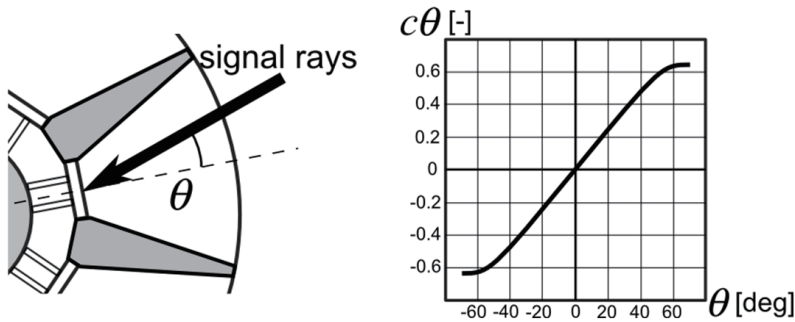


図6 光入射角検出機能

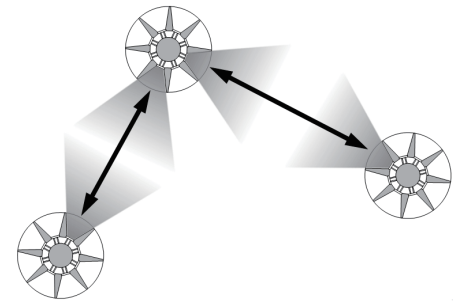


図7 複数方向との並行送信

空間分割型光通信システムの受光素子に用いる光入射角センサはデータ伝送速度で応答できる。このため混信は、受信データの破損のほか、入射角情報の混乱からも検出することができる。IEEE 802.11を拡張した、空間分割型光通信システムのための通信制御方式を考案した。通常の手続きはIEEE 802.11とほぼ同じなので、この通信制御方式で特徴的な混信解消手続きを以下に記述する。

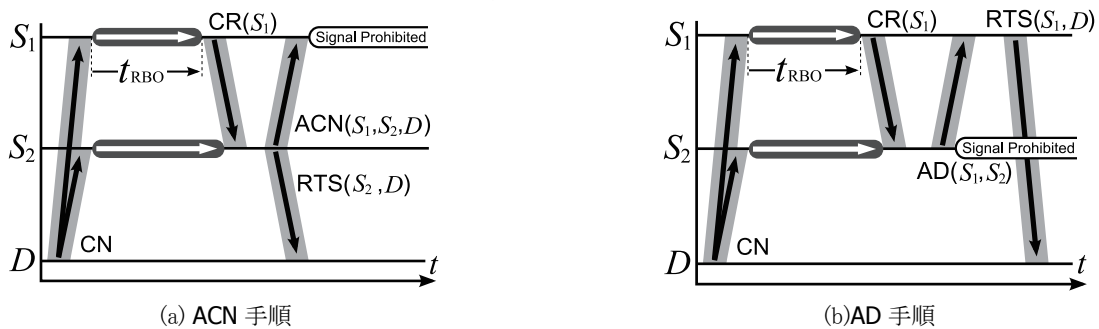


図8 通信優先権獲得のタイミング・チャート

2つの送信ノード(S_1, S_2)と1つの受信ノード(D)の3ノードに対する混信解消手順を検討した。図8に3ノードの混信解消手順を示す。手順は次の順序で行われる。

1. 送信ノード S_1 と S_2 が受信ノードDに同時に送信要求(RTS)を送出したとき、受信ノードDが同じ受光素子で受信したならば、受信ノードDは混信した信号を受信する。
2. 混信した信号を受信した受信ノードDは、混信検知通知(CN: Collision Notification)を信号の到来方向に送信する。
3. 混信検知通知(CN)を受信した送信ノード S_1 と S_2 は、調停要求(CR: Consultation Request)を周囲に送出する。
4. 混信検知通知(CN)と調停要求(CR)の両方を受信した送信ノード S_2 は、それらの内角を角度検出情報を元に計算する。
- 5(a). 送信ノード S_2 が混信検知通知(CN)と調停要求(CR)を異なる受光素子で受信した時、送信ノード S_2 は通信優先権を獲得しアービタ立候補通知(ACN: Arbitrator Candidacy Notification)を送信する。図8(a)。

- 5(b). 送信ノード S_2 が混信検知通知 (CN) と調停要求 (CR) を同じ受光素子で受信したとき、送信ノード S_2 は通信の権利を喪失しアービタ辞退通知 (AD: Arbiter Declination) を送信して、他の通信が終るまでチャンネルの解放を待つ。図 8 (b)。
- 6(a). 送信ノード S_1 がアービタ立候補通知 (CAN) を受信した時は、他の通信が終るまでチャンネルの解放を待つ。図 8 (a)。
- 6(b). 送信ノード S_1 がアービタ辞退通知 (AD) を受信した時は、通信の優先権を獲得する。図 8 (b)。
7. 通信優先権を獲得したノードは、受信ノード D に向けて送信要求 (RTS) を再送出する。混信がなければ受信ノード D は通信許可 (CTS) を返信し、通信が開始される。
この方式では、通信優先権を獲得したノードは一時的に局所的な調停ノード:アービタとなる。

5-2 動的な通信網における空間分割型時分割通信制御方式の検討

第 4 章 4-2 節(2)に述べたように、Carrier Sense 型通信制御方式は RTS の送信を含めランダムなタイミングで通信を開始するので、送信データの一部が混信で破損してもすべての送信データを再送する必要があり、ネットワークのスループットを低下させる。スループットを向上させる方策として時分割型通信制御方式が提案されているが、集中管理ノードを必要とするなどアドホック・ネットワークに向かない性質を有する。そこで、近隣ノードとの間でアービタを決定し、基準時間の調整や Time Slot の割り当てをアービタから送信する方式を考案した。

ネットワークを構成する各ノードは、次の3つのフェーズ「隣接ノード確認フェーズ」・「時分割型通信フェーズ」・「競合型通信フェーズ」を周期的に繰り返す。この3つのフェーズの長さ M は全ノードで同一とする。

隣接ノード確認フェーズは、 M_1 個の Time Slot 期間に各ノードが互いにハローパケットを送信し、周囲に存在するノードの方向を確認すると同時に、各ノードのアービタ優先順位を決定する。最も優先順位の高いノードは、周囲のノードに対して通信許可を与えるアービタとなる。一方、優先順位の低いノードはハローパケットの交換を通じて、アービタの通信タイミングと同期を図る。

時分割型通信フェーズでは、 M_2 個の Time Slot 期間に、アービタが周囲のノードに時分割で通信許可を与え、許可されたノードのみが通信を行なう。次の競合型通信フェーズでは M_3 個の Time Slot 期間中(時分割型通信フェーズで)通信許可が得られなかったノード同士が競合しあいながら通信を行なう。図 9 に通信周期と Time Slot の配置を示す。

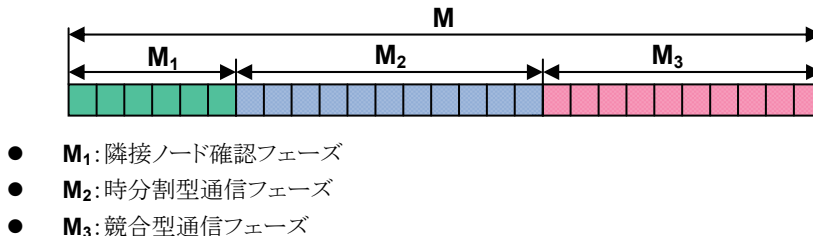


図 9 提案時分割型通信制御方式の通信周期と Time Slot の配置

6 結言

本研究では、複数の移動ロボットによる共同作業を想定し、考案した空間分割型光通信システムのための Carrier Sense 型通信制御プロトコルおよび、時分割型通信制御プロトコルについて検討を行った。光通信におけるデータ伝送方式の検討など当初の研究計画から漏れていた項目もあり、研究期間中に提案方式の定量的な評価など研究完遂には到らなかったが、多くの実質的な考案を得ることができ有意義な研究であった。

本研究の結果をまとめていた平成 23 年 3 月 11 日、東北・関東地方の太平洋側で未曾有の大規模な地震が発生し、それに伴う津波によって極めて広い地域が被災した。なかでも東京電力福島第一原子力発電所では 4 基の原子炉が破損し、多くの放射性物質を外部に放散することとなった。破損した原子炉の廃炉作業では、放射線被曝防止の観点から移動ロボットの遠隔制御による作業が望ましいことは自明である。複雑な作業を遂行するためには、必要な機能・性能をもつロボットを必要とする数・必要とする場所・必要とする時に投入できなければならない。そしてそれらのロボットは互いに邪魔にならないよう協調を図って作業できなければならない。本研究の必要性を裏付ける事象が、国内の原子力発電所で発生したことは残念であるが、できるだけ早く本研究を完遂し、成果を実用化できるよう努力したい。

【参考文献】

- [1]松下温 監修、重野寛 著、「～ネットワーク・ユーザのための～ 無線LAN技術講座」, 第 1 刷, (株)ソフト・リサーチ・センター 1994年9月
- [2]桜井豊 監訳、柏木由美子 訳、「詳説イーサネット」, 初版第1刷, オライリー・ジャパン 2000年12月 pp.3-6, (Charles E. Spurgeon, “Ethernet The Definitive Guide”, O’reilly)
- [3]C-K. Toh 著、構造計画研究所 訳,「アドホックモバイルワイヤレスネットワーク ～プロトコルとシステム～」, 初版第1刷, 共立出版 2003年5月 (C-K. Toh, “AD HOC MOBILE WIRELESS NETWORKS: PROTOCOLS AND SYSTEMS”, 1st Ed., Prentice Hall PTR, 2002)
- [4]無線データ通信研究会 編著,「～情報ネットワーク技術～ 無線データ通信入門解説」, 第 1 刷, (株)ソフト・リサーチ・センター 1994年4月
- [5] Ko, et al., “Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks”, Proceedings of IEEE INFOCOM 2000(1) pp.13-21, 2000
- [6]Korakis, et al., “CDR-MAC: A Protocol for Full Exploitation of Directional Antennas in Ad Hoc Wireless Networks”, IEEE Transactions on Mobile Computing 7(2) pp.145-155, 2008
- [7]笠野英松 監修、マルチメディア通信研究会 編,「ポイント図解式 通信プロトコル事典」, 第一版第 5 刷, (株)アスキー 1998年11月
- [8]笠野英松 監修、マルチメディア通信研究会 編,「ポイント図解式 インターネット RFC 事典」, 初版, (株)アスキー 1998年11月
- [9]Yoshida et al., “Performance Analysis of Local Communication by Cooperating Mobile Robots”, IEICE Transactions on Communications E83-B(5) pp.1048-1059 2000

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Simulation of Geometrical Wireless Communication Control of Mobile Robot Ad Hoc Networks	The 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2009)	September 2009
指向性アンテナを有する移動体によって構成されるアドホックネットワークにおける分散制御手順	電子情報通信学会 第 28 回アシユアランスシステム研究会技術研究報告	2009年11月
A Communication Protocol Based on IR-Space Division Transceivers for Mobile Robots	The 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics (ARoB'10)	February 2010
A Communication Protocol Based on IR-Space Division Transceivers for Mobile Robots	Artificial Life and Robotics, Vol.15 No.2 pp.176-180 (Springer)	2010