

マイクロ波UWBタグの一点測位技術開発

Development of Microwave Ultra-Wide-Band Tag Location System Using Stand-Alone Reader Architecture

中川 洋一
Yoichi Nakagawa

深川 隆
Takashi Fukagawa

向井 裕人
Hirohito Mukai

浅沼 努
Tsutomu Asanuma

安木 慎
Makoto Yasugi

岡田 亨
Toru Okada

要 旨

GPS (Global Positioning System) が利用できない屋内環境における高精度な動体位置特定用途には、時間領域の分解能に優れたUWB-IR (Ultra-Wide-Band Impulse Radio) による無線測位が有効である。筆者らは、高精度測位と同時に簡易設置を実現するUWBタグの一点測位技術を開発した。マイクロ波のハイバンドにおいて、パルスを再放射するUWBタグとタグからの折り返し伝搬時間と到来方向に基づいて測位するリーダを試作し、一点測位技術による測距の平均誤差が50 cm、移動タグのリアルタイム測位誤差は±1 m以下を実証した。

Abstract

For mobile target positioning in indoor environments, where the Global Positioning System (GPS) cannot be utilized, Ultra-Wide-Band Impulse Radio (UWB-IR) can be used due to its high resolution in the time domain. The authors have been developed a UWB tag location system using stand-alone reader architecture in order to realize precise location and easy system installation. The equipment consisting of the UWB tag retransmitting the pulse and the reader estimating its position based on both time and angle of the roundtrip propagation pulse were developed in the microwave high-band, and it was confirmed that the root mean square error of the ranging is 50 cm and the real-time location error is below 1 m for moving tags.

1. はじめに

近年、セキュリティや省電力などを実現する動体位置特定の技術として、GPSが利用できない屋内環境における高精度な無線測位技術への期待が高まっている。例えば、ID (Identification) 認証用無線タグのリアルタイム測位により、オフィスへの入室管理や工場内の作業動線分析が実現できる。さらには、歩行者の追跡により、照明やエアコンなどの家電制御への展開も期待されている。

屋内の高精度測位を実現するためには、数ns以下の時間分解能を有するUWB-IRを用いた動体位置特定が有効である[1][3]。既に米国では、マイクロ波帯のUWB-IRを利用した無線タグの測位システムが商用化されている[2]。このUWB-IRを用いた測位システムは、屋内の複雑な電波環境において、無線LANなどを用いた他の測位技術では不可能であった1 m以下の測位精度を実現している。

従来、UWB-IRを利用した無線タグの動体位置特定では、測位用のタグリーダを室内の四隅に配置する多点測位方式が一般的であった[2][6]。この方式は、送信のみのUWBタグを用いて、無線によりID情報を取得する、いわゆるRFID (Radio Frequency Identification) とタグの座標位置特定が可能になる。しかし、多点測位方式は、各リーダで推定される到来時間差に基づいており、リーダ間の時間同期が必要なだけでなく、すべてのリーダの座標位置をあらかじめ取得しておく必要があった。

これに対して、当社は、単独のタグリーダでRFIDと同時にタグの位置特定を実現できる測位方式を提案している。この測位方式は、リーダの送信パルスをタグがID信号として再放射し、リーダはID検出すると同時に、折り返し伝搬時間と到来方向に基づいて位置特定する。つまり、一点で測位できるため、リーダの時間同期や座標位置の計測が不要になり、設置性に優れたより簡易なシステム構成でUWB-IRの高精度測位を実現できる。

ここでは、この一点測位技術に関して、方式の原理、マイクロ波帯での実証に向けた試作装置の特徴とそれを用いた実験による測位性能の定量評価結果について述べる。

2. UWB信号特性と国内法規制

本章では、技術開発の前提となる、測位用途に適したUWB-IR信号の物理的特性とマイクロ波UWBの国内法規制について説明する。

2.1 UWB-IR信号の物理的特性

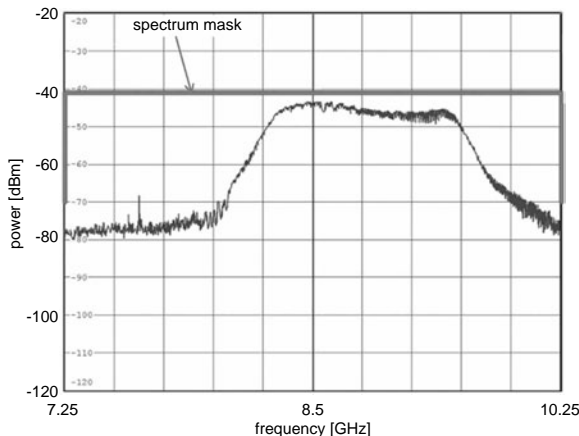
実使用時の厳しいマルチパス環境における先頭波検出が無線測位における根本課題である。UWB-IR信号の非常に短いパルスは、1 m 以下の高分解能な測距を可能にする。例えば、1 GHz 超の占有帯域幅を確保することで、2 ns のパルス時間幅を実現できる。この2 ns 幅のパルスは、折り返し伝搬時間に基づく測距において、理論的に

30 cm の距離分解能に相当する．このような高分解能特性により，タグ周囲の物体からの散乱波とタグから折り返される先頭波を分離して検出できる．

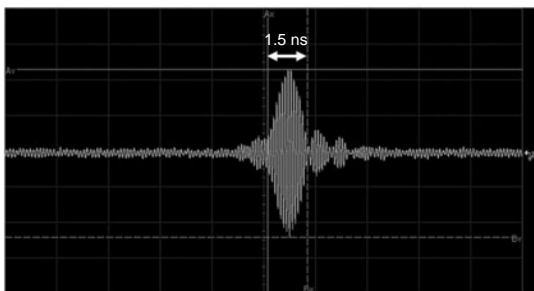
また，パルス繰り返し周期を1 ms とすると，パルス幅2 ns と繰り返し周期の比であるduty-cycle は0.2 %となる．つまり，UWB-IR通信は短いパルス幅で間欠駆動のパルス通信である．したがって，平均送信電力が非常に小さくできるため，特に電池駆動型タグにおける無線回路の低消費電力化に適した通信方式である．

2.2 マイクロ波UWBの国内法規制

マイクロ波UWBは，他システムへの干渉を考慮して送信電力が-41.3 dBm/MHz 以下に定められている．国内では，無線機器の技術的条件がARIB (Association of Radio Industries and Businesses) 標準規格として定められており，3.4 GHz ~ 4.8 GHz帯のローバンドと7.25 GHz ~ 10.25 GHz帯のハイバンドとするスペクトラムマスクが規定されている[4]．また，屋内使用に限定されており，現在，伝送レートが50 Mbit/s以上に制限されている．さらに，ローバンドでは，干渉軽減技術の導入を検討中であるが，現状2013年末までは具備せずとも使用可能である．



(a) ハイバンドUWBの送信スペクトラム
(a) Transmit spectrum of microwave high-band UWB



(b) UWB-IR信号の時間波形
(b) Time domain waveform of UWB-IR

第1図 ハイバンドマイクロ波のUWB-IR信号特性

Fig. 1 Property of UWB-IR signal in high-band microwave

第1図は，ハイバンドマイクロ波のUWB-IRを用いた無線機器の送信スペクトラムと，このスペクトラムを有するUWB-IR信号の時間波形の実測値を示している．このように，法規制のスペクトラムマスクに満たしつつ，非常に短いパルスを生成できるため，優れた時間分解能を実現できる．

3. UWB一点測位技術の原理

本章では，開発した技術の特長を明確にするために，従来システムの課題とUWBタグの一点測位技術に関して，その原理を中心に説明する．

3.1 従来技術の課題

既存システムは，送信のみのUWBタグと到来時間差に基づいて3次元測位を実現する4つの測位リーダを用いた構成である[2][6]．多点測位方式は，測位点間つまりリーダ間の高精度な時間同期を必要としていた．このため，基準クロックを共有するための同軸ケーブルを敷設するか，もしくは無線の基準送信源を加えるシステム構成となっていた[5]．さらに，タグの位置特定のためには，システム設置の際に，各リーダおよび基準送信機の座標位置の計測をする必要があった．

3.2 UWBタグの一点測位技術の原理と特長

筆者らは，従来課題であった測位リーダ間の同期とシステム設置時の計測を不要とするために，タグからの折り返し伝搬時間と到来方向に基づく一点測位技術を開発した．

本技術では，まず測位リーダから送信されたパルス系列をUWBタグが受信検波後に増幅して再放射する．その再放射パルス系列を，単独の測位リーダが受信してタグIDと同時に折り返し伝搬時間と到来方向を検出する．折り返し伝搬時間に基づく高精度な測距を実現するために，UWBタグは電池駆動型にして送信電力を確保するとともに，デジタル処理を介さない簡易な回路構成でパルスを再放射して時間精度を保証する．さらに，UWB-IR信号のアレイアンテナによる到来方向推定のために，一定周期のパルス系列となるUWB-IR信号の周波数特性が等間隔の複数トーンとなることを利用して，アレイ受信信号の位相検出精度を確保している．具体的なUWBタグの回路構成や測位リーダにおける推定処理は後述する．

本技術の使用条件としては，測位リーダが天井高に設置され，測位対象であるUWBタグは歩行者が具備することが想定される．倉庫や工場といった比較的大きな屋内設備においては，測位リーダの設置高は4 m 程度である

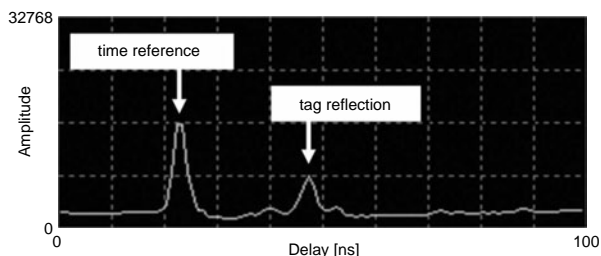
ため、歩行者が携帯するUWBタグとの高低差は3 m 程度となる。このとき、例えば測位リーダの位置から床面距離10 m にあるUWBタグを測位精度1 m で検出するためには、到来方向推定による角度の検出誤差を5° 以下とする必要がある。

3.3 ID検出と折り返し伝搬時間による測距の方式

ここでは、UWBタグのIDと折り返し伝搬時間推定による距離を同時に検出する方式について説明する。

測位リーダは、自リーダの測位エリアを定めるためにUWB-IR信号のユニークワード（UW）を繰り返し送信する。このUWは、On-Off-Keying（OOK）変調された64ビットのパルス系列である。このUWを受信したUWBタグ装置では、ID情報として比較的長い周期でOOK変調された符号を重畳するようにして再放射する。具体的には、ID符号の1ビットに相当する1フレームを16-UWで構成し、ID符号長を最大128ビットとするためにIDの送信区間である1バーストを128フレームで構成する。

第2図は、次章で紹介するハイバンドUWB測位装置を用いた遅延プロファイル算出結果の例を示している。UWBタグから折り返し伝搬された先頭波は、測位リーダの送受信アンテナ間結合を基準波として、到達時間差から推定できる。



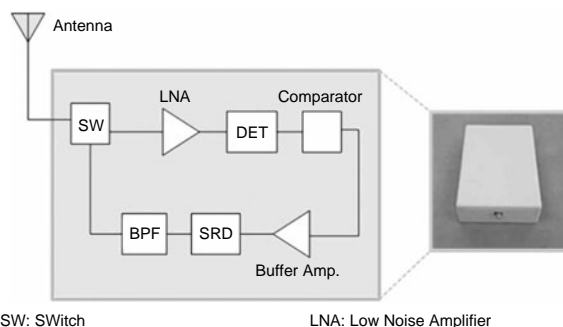
第2図 遅延プロファイルに基づいた測距の例
Fig. 2 Sample of measured delay profile for ranging

4. マイクロ波UWB測位装置の開発

前章で述べたUWBタグの一点測位技術を、ハイバンドマイクロ波帯において実証するために開発したマイクロ波UWB測位装置の特徴を述べる。なお、本装置は、UWBタグ装置と測位リーダ装置を総称している。

4.1 パルス再放射UWBタグと一点測位リーダの特徴

第3図は、パルス再放射型UWBタグ装置の基本回路構成を示している。アンテナで受信されたUWB-IRパルスは、ダイオード検波器（DET）からコンパレータを介してタイミング検出が可能になる。このコンパレータ出力

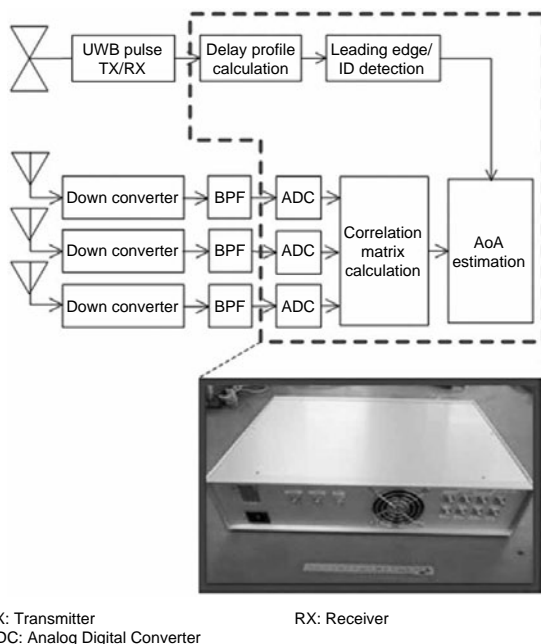


第3図 UWBタグ装置の基本回路構成とプロトタイプの外観
Fig. 3 Basic configuration of UWB tag and picture of tag prototype

を増幅して、ステップリカバリダイオード（SRD: Step Recovery Diode）へ直接入力する。SRDは、入力信号のエッジタイミングでパルスを出力するため、受信パルスに対する時間同期が保証されるようになる。さらに、前述した法規制を満たすために、SRDの発振パルスをバンドパスフィルタ（BPF: Band Pass Filter）に通して帯域制限を掛けている。

このように、増幅後のパルスを再放射する回路構成を採用することで、10 m の測位エリアを確保している。また、制御パルス幅に対してパルス繰り返し間隔が非常に大きいUWB-IRの特性を生かすことで、タグ内部における送信信号と受信信号の干渉を回避できる。

第4図は、一点測位用リーダ装置の機能ブロック構成を



第4図 測位リーダ装置の機能ブロック構成とベースバンド部プロトタイプの外観
Fig. 4 Functional block diagram of reader and picture of prototype of baseband unit

示している。UWBタグのID検出と測距を同時に実現するために、測位リーダはUWB-IR信号のUWを繰り返し送信し、UWBタグはID情報を重畳して再放射する。このとき、測位リーダ装置は、既知であるUWのパルス系列を用いて受信信号に対するスライディング相関処理を実行し、フレーム区間の平均化により遅延プロファイルを算出する。遅延プロファイル上でのビット判定後、1バースト区間における折り返し伝搬時間とビット判定値がメモリーに記録される。記録されたビット系列からタグIDを検出するとともに先頭波も同時に決定する。

一方で、高精度な到来方向推定には、アレイ信号処理に用いる受信信号の位相精度を補償することが課題である。ここでは、以下のようなUWB-IR信号の周波数特性を利用するアプローチを採用した。例えば、200 ns周期のパルス繰り返し信号は、周波数スペクトラム上に、5 MHz間隔のトーン並ぶ信号となる。第4図に示すように、アレイアンテナの受信回路において、このトーン信号成分をBPFで抽出することにより、比帯域の大きなUWB信号の位相検出精度を確保している。また、実環境のマルチパス対策として、到来方向推定部は測距部で検出された先頭波の受信タイミングを取得する。

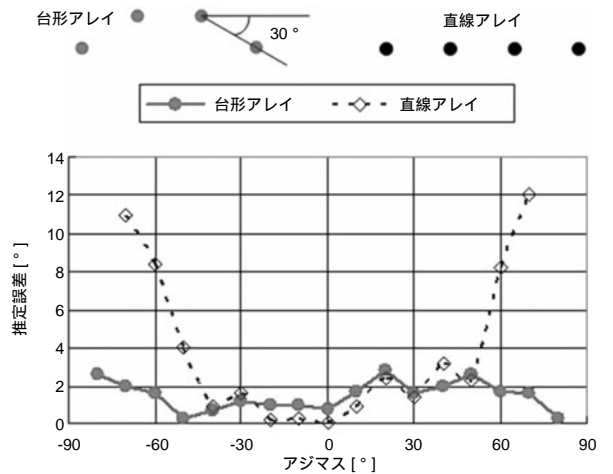
4.2 アレイアンテナ到来方向推定の広角化手法

次に、到来方向推定用のアレイアンテナとして台形アレイ構成による広視野角化の手法について説明する。

一般によく用いられる直線アレイは、ボアサイト方向（アレイアンテナの正面方向）においては精度が良いのに対して、エンドファイヤ方向（横方向）において精度が大きく劣化する。これは、エンドファイヤ方向になるにつれ、アレイアンテナの合成ビーム幅が広がっていくという物理特性によるものである。このように、直線アレイでは実効的に到来方向推定における視野角が90°程度であるのに対して、台形アレイを用いることでこの視野角を160°まで広げることが可能になる。

第5図に、4素子の直線アレイと台形アレイによる到来方向推定の誤差特性を水平面内で評価した実験結果を示している。この実験では、電波暗室内に第4図に示した測位リーダ装置の到来方向推定用アレイアンテナを設置し、アレイアンテナを水平面内で回転させながら、アジマス10°ステップで推定誤差を測定した。この結果が示すように、台形アレイの採用によるエンドファイヤ方向の推定精度向上を確認できた。

また、台形アレイのような平面配置のアレイアンテナは、原理的に水平角だけでなく仰角も同時にビーム走査可能である。このため、測位対象であるタグとリーダの相対的な高さをあらかじめ予測できないような用途にお



第5図 台形アレイを用いた到来方向推定の視野角特性

Fig. 5 Property of filed of view on direction finding with trapezoid array

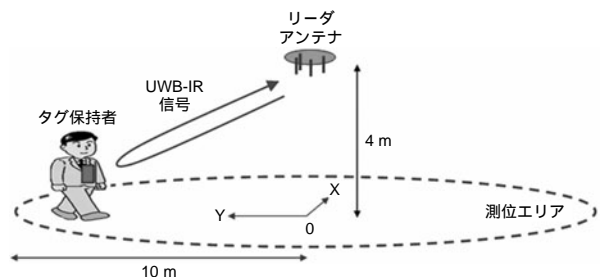
いても、1つのリーダでタグの位置を高精度に特定できる。

5. 高精度な動体位置特定の実験検証

ここでは、前記のマイクロ波UWB測位装置を用いた静止タグの測距実験と移動タグのリアルタイム測位実験の結果を述べて、UWBタグの一点測位技術による高精度な動体位置特定を実証する。

第6図は、一点測位技術を用いたシステム構成のイメージ図である。オフィスや工場などの天井に設置されたリーダアンテナが送受信するUWB-IR信号を用いて、測位エリア内にあるタグ保持者の位置をリアルタイムに特定する。

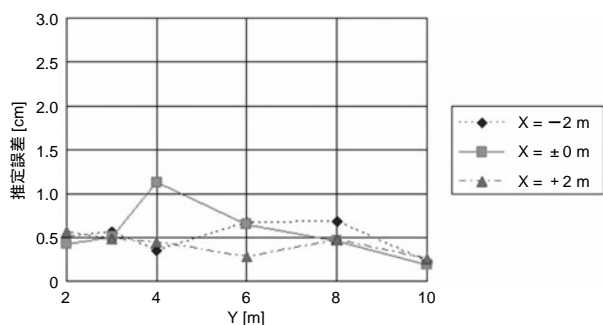
実験では、距離10 mの測位エリアを確保できる大型の電磁波シールドルーム内に、測位リーダ装置を高さ4 mに設置した。電池駆動のUWBタグ装置は歩行者が携帯したため、1.5 m ~ 1.7 mの高さとなった。測位エリアはリーダ設置点を座標原点 (X, Y) = (0, 0) とするXY座標平面であり、リーダ正面方向をX = ±0の直線と定めた。



第6図 一点測位技術を用いたシステム構成

Fig. 6 System configuration of proposed

はじめに、 $X = -2, \pm 0, +2$ の直線上における静止タグの測距実験を実施した。この実験では、1人のタグ保有者が2 m 間隔で移動しながら、それぞれ測定点では静止条件で測距性能を評価した。第7図は、このような静止条件における距離推定誤差の実験結果を示している。図において、横軸は測位点のY座標を、縦軸が距離の推定誤差をそれぞれ表している。ここで、図に示したすべての測定点に対する推定誤差の平均値は49.6 cmであった。

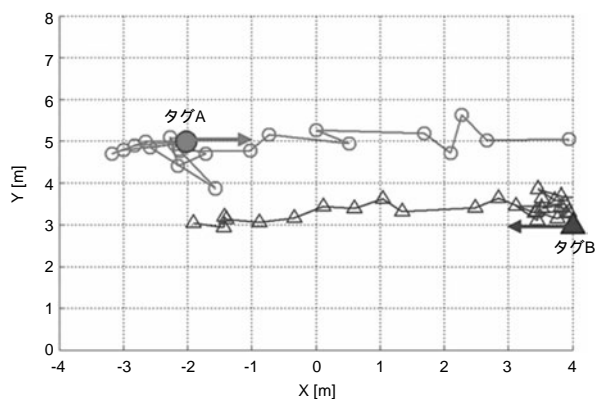


第7図 静止タグの測距実験結果

Fig. 7 Experimental result on ranging of static tag

次に、2人のタグ保有者が約1 m/s の歩行速度で移動するリアルタイム測位実験を実施した。ただし、UWBタグ装置はともにID 送信間隔を平均時間 200 ms に設定し、測位リーダ装置はUWBを連続送信するように設定した。

第8図は、歩行者が携帯した2タグのリアルタイム測位結果である。2つのプロット線が測定されたタグの軌跡であって、歩行を開始した座標点はタグAが $(X, Y) = (-2, 5)$ とタグBが $(X, Y) = (4, 3)$ であり、測定開始から3秒後に歩行を開始した。ここで、それぞれの歩行者は $Y = 5$ と $Y = 3$ の線上を移動したことから、推定誤差は ± 1 m 以下であった。



第8図 移動タグのリアルタイム測位実験結果

Fig. 8 Experimental result on real-time tracking of 2-tag location

6. まとめ

筆者らは、高精度測位と同時に簡易設置を実現する一点測位技術を提案し、ハイバンドマイクロ波のUWBタグと測位リーダを試作して実験により測距の平均二乗誤差が50 cm、移動タグのリアルタイム測位誤差は1 m 以下を確認した。また、IDと距離を同時に検出する測距方式、測位エリア10 m を達成するためのタグ回路、高精度かつ広視野角な到来方向推定に関する要素技術を開発した。

今後は、マイクロ波UWBの法制化動向を見据えて、オフィスの入退管理や工場の動線解析などのシステム提案を推進するとともに、一点で測位できるという本技術の特長を生かして、さまざまな家電機器への搭載を想定した新たな用途についても検討していく。

参考文献

- [1] H. Liu et al., "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, vol.37, no.6, Nov. 2007.
- [2] R. J. Fontana, "Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol.52, no.9, Sept. 2004.
- [3] S. Gezici et al., "Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks," IEEE Signal Process. Mag., vol.22, no.4, pp.70-84, Jul. 2005.
- [4] UWB (超広帯域) 無線システム ARIB標準規格 T91 Ver.1.1, 2008.
- [5] K. Mizugakil et al., "Accurate wireless location/communication system with 22-cm error using UWB-IR," IEEE Radio and Wireless Symposium, Jan. 9-11, 2007.
- [6] F. Tappero et al., "Decimeter-level positioning engine for an indoor ultra-wideband/laser scanner positioning system," European Navigation Conference - Global Navigation Satellite Systems, May 3-6, 2009.

著者紹介



中川洋一 Yoichi Nakagawa
東京R&Dセンター 通信コアデバイス開発センター
Communication Core Devices Development Center,
Tokyo R&D Center



深川 隆 Takashi Fukagawa
東京R&Dセンター 通信コアデバイス開発センター
Communication Core Devices Development Center,
Tokyo R&D Center



向井裕人 Hirohito Mukai
東京R&Dセンター 通信コアデバイス開発センター
Communication Core Devices Development Center,
Tokyo R&D Center



浅沼 努 Tsutomu Asanuma
パナソニック システムネットワークス (株)
Panasonic System Networks Co., Ltd.



安木 慎 Makoto Yasugi
東京R&Dセンター
Tokyo R&D Center



岡田 亨 Toru Okada
パナソニック システムネットワークス (株)
Panasonic System Networks Co., Ltd.