

測位センサネットワークによる加速器施設の 防災・放射線管理のための位置管理システムの開発

DEVELOPMENT OF THE POSITION MANAGERIAL SYSTEM BASED ON THE POSITIONING SENSOR NETWORK FOR DISASTER PREVENTION AND RADIATION MANAGEMENT OF THE ACCELERATOR FACILITY

川端康夫^{#, A)}, 松田浩朗^{A)}, 松元和伸^{A)}, 田村 琢之^{A)}, 田頭茂明^{B)},

小林 薫^{C)}, 山本 祐輔^{C)}, 前田 修^{D)}, 大場俊幸^{E)}, 吉岡正和^{F)}

Yasuo Kawabata^{#, A)}, Hiroaki Matsuda^{A)}, Kazunobu Matsumoto^{A)}, Takuyuki Tamura^{A)}, Shigeaki Tagashira^{B)},

Kaoru Kobayashi^{C)}, Yusuke Yamamoto^{C)}, Osamu Maeda^{D)}, Toshiyuki Ohba^{E)}, Masakazu Yoshioka^{F)}

^{A)} TOBISHIMA Corp. ^{B)} Kansai Univ. ^{C)} Kobe City College of Technology.

^{D)} Kobe City. ^{E)} NAT ^{F)} KEK

Abstract

The paper shows the development of positioning information system using a local area network to ensure the safety of users in emergency in long tunnels like ILC facility. The system provides information of not only user-position in confined facilities, but also residence time and movement of the users, which can be easily transmitted on the interactive communication system.

We conducted two experiments to confirm the effectiveness of the positioning information system. One of the experiments was conducted in a medical facility where the accelerator is used for radiotherapy. Another experiment was conducted in a long tunnel which we aim to simulate the operation in the similar condition of ILC facility.

1. はじめに

東日本大震災の際の危機的状況の中で、J-PARCで作業中の職員がトンネル内からの脱出に時間を要したことが本研究開始の発端である。

加速器施設においては、施設利用者に対する放射線の管理や災害時の安全確保が極めて重要である。従来、大型加速器施設においては、PPSが適用され^[1]、施設入場者の安全性確保に効果を発揮している。これに加え、施設利用者の位置やその動線に基づく管理、さらに発災時に適正な避難誘導が行えるシステムを実装できれば、さらに有効性は高まるものと考えられる。

一方、筆者らは、モバイル端末を利用した屋内向け測位センサネットワーク技術の開発^{[2],[3]}に取り組んでいる。測位センサネットワーク技術とは、モバイル端末を測位センサとして利用し、情報通信と同時にモバイル端末の通信位置を特定するものである。本技術により、空間内のモバイル端末保有者の所在やその動線等が把握可能となる。

本研究は、加速器施設の利用者の安全性向上を目的に、測位センサネットワーク技術を応用し、加速器施設における位置情報に基づく放射線管理・防災システムを開発するものである。既に、本システムの有効性の検証を目的に、いばらき中性子医療研究センター（以下、iNMRCと記す）での実験を開始し、モバイル端末を有する人物の所在と動線がリア

ルタイムに把握できることを確認した^[4]。

本論文では、システムの精度向上のために実施した、以下の2つの取組み結果について報告する。

一つは、iNMRC建屋内での測位精度について、具体的には、それぞれの部屋と廊下に、複数の無線LAN基地局（以下、APと記す）を設置し、在館者の正確な滞在部屋および入退室時刻の管理に関して検証した。

もう一つは、ILCを想定した既存の直線状の長大かつ小断面トンネル（神戸ベルトコンベアトンネル）を用いて、無線LANの通信速度と同時測位の精度について検証した。本実験では、iNMRCとは異なる測位方式（近接方式によるブロック管理から、三角測量方式による座標管理）を採用して、APの配置方法（並列配置、千鳥配置、片側直線配置）が測位精度にどのような影響を及ぼすのかを明らかにし、位置管理システムの適用性・有効性を検証する。

2. 測位センサネットワークによる位置管理システムの概要

Figure 1に開発システムの構成を示す。開発システムは、無線LAN端末、APおよび測位解析サーバで構成される。無線LAN端末は測位対象の研究者等が所持し、逐次電波を発信する。APは、無線通信ネットワーク機能に加え、無線LAN端末が発信した電波情報（端末識別情報、電波強度）を取得する測位センサ機能を有しており、測位センサネットワークを構築している。APが取得した電波情報は

[#] Yasuo_Kawabata@tobishima.co.jp

測位解析サーバに送られ、無線 LAN 端末位置が測位される。なお、開発システムの測位方式としては、一番電波強度が大きい AP 位置（管理位置）を無線 LAN 端末位置とする近接方式^[5]と三角測量方式による座標管理の 2 種類を採用している。

開発システムでは、端末位置を任意の時間間隔で連続的に解析可能で、リアルタイムに位置管理が可能である。また、位置情報は管理位置ごとにデータベースにまとめられ、無線 LAN 端末ごとに、それぞれの管理位置の滞在時間を自動的に集計できる。

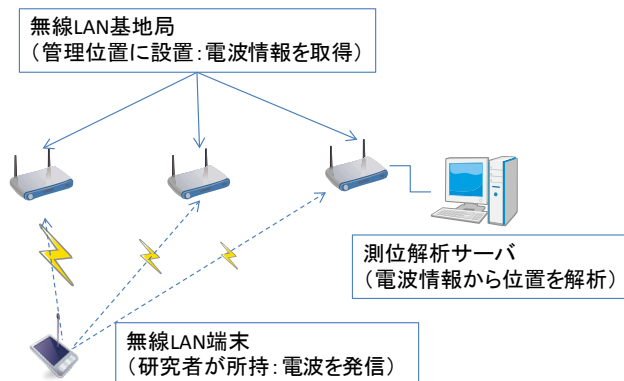


Figure 1: Basis of positioning.

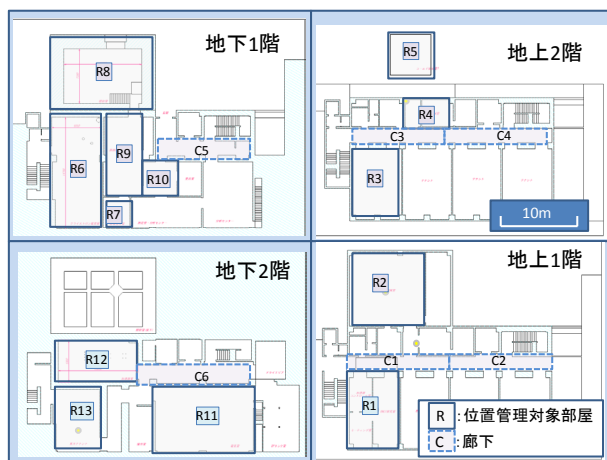


Figure 2: Installation of a wireless LAN base station and position management room(R1~R13, C1~C6).

3. iNMRC での測位精度の検証

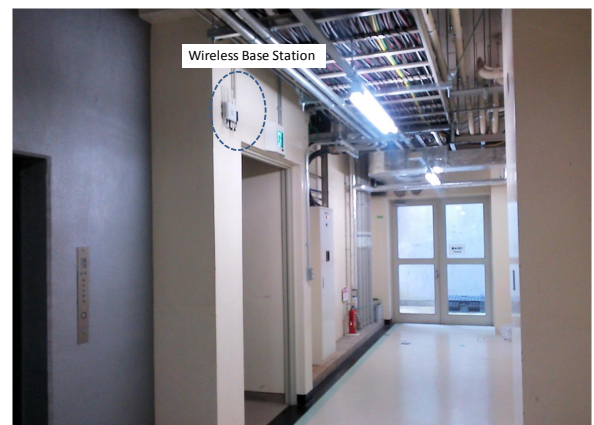
3.1 実験概要

実験は、iNMRC（地上 3 階，地下 2 階，建築面積約 650m²）において実施している(Photo 1, 2 参照)。本実験では、地下 2 階から地上 2 階の 13 部屋

（以下、R1~R13 と記す）を管理対象とし（Figure 2 参照），それぞれの部屋（13 台）と部屋をつなぐ廊下に 6 台（以下、C1~C6 と記す），計 19 台の AP を設置した（Photo 2(a),(b)参照）。また、1 秒間隔で電波を発信する無線 LAN 端末を持った実験者がそ



Photo 1: Ibaraki neutron medical research center.



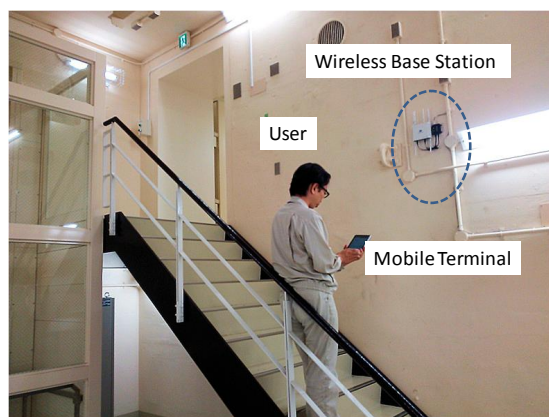
(a) Corridor (B2)



(b) Lounge (for a Patient)

Photo 2: An example of installation of wireless base station.

それぞれの部屋に一定時間（本実験では 15 分以上）滞在し、実際の滞在部屋，入室時刻，ならびに退室時刻を記録した。開発システムの測位解析は、20 秒間隔（20 秒間の電波強度の平均値）で実施し、実際の記録と開発システムによる測位結果とを比較した。実験状況の一例を Photo 3(a),(b)に示す。開発システムはネットワーク通信が可能であり、無線 LAN 端



(a) Irradiation chamber



(b) Mobile terminal screen

Photo 3: An example of experimental appearance.

Table 1: Comparison of the Analysis Results and the Measurement Results

実際の記録			測位結果			評価
滞在部屋	入室時刻	退室時刻	滞在部屋	入室時刻	退室時刻	
R1	14:51	15:04	R1	14:51	15:05	○
R2	14:52	15:06	R2	14:52	15:06	○
R3	15:18	15:44	R3	15:18	15:45	○
R5	15:21	15:46	R5	15:21	15:46	○
R6	15:16	15:43	R6	15:16	15:43	○
R7	14:52	15:08	R7	14:52	15:08	○
R8	14:37	15:09	R8	14:37	15:10	○
R9	14:52	15:08	R9	14:52	15:10	○
R10	15:01	15:07	R10	15:01	15:08	○
R11	14:52	15:11	R11	14:52	15:11	○
R12	15:13	15:42	R12	15:12	15:42	○
R13	15:15	15:42	R13	15:14	15:43	○

入室回数	評価
R4	×
C3 (廊下)	×
R4	×
C3 (廊下)	×
R4	×
.....
C3 (廊下)	×
R4	×

末画面上で自端末および他端末の位置が確認可能である。

3.2 実験結果

Table 1 に実際の記録と開発システムによる測位結果との比較を示す。表より、開発システムでは、R4を除く部屋において、ほぼ正確に実験者の滞在部屋、入室時刻、ならびに、退室時刻を検出している。

ここで、R4において、実際は15時19分から15時45分まで滞在していたにもかかわらず、開発システムでは、実験者がR4とC3(地上2階廊下)との出入りを頻繁に繰り返した結果となっている。こ

れは、R4とC3に設置したAP位置が近く、それぞれのAPが取得する、無線LAN端末が発信する電波の強度に明確な差がなかったことが原因と考えられる。この対策としては、APの設置位置の変更やAPのアンテナ角度の調整により電波強度に差を生じさせることや、R4およびC3以外のAPが収集する情報を利用した測位方式(環境分析方式^{[5])}への変更が考えられる。

4. 長大トンネルでの測位精度の検証

4.1 実験概要

Figure 3 にベルトコンベアトンネルの全体図を示す。その中で、陸側部のベルトコンベアトンネルの一部(D3トンネル:断面積が17.4 m²の小断面トンネルの約800 m区間)を用いて、無線LANの通信速度、通信遅延と同時測位の精度について検証した。ここで、通信速度はデータ転送の速度で、通信遅延はデータ転送の遅れ(遅れて声が伝わる等)である。

検証に用いた小断面トンネルの内観をPhoto 4に示す。また、同トンネルの標準断面をFigure 4に示す。なお、本実験では、APの配置が測位精度に及ぼす影響を検証するために、4種類のAP配置について実験を行った。4種類のAP配置は、Table 2に示す通りである。また、同表にはトンネル内でのAPの配置イメージも示している。

実験に用いたAP(大きさ:10×10×5cm)はPhoto 5に示す。また、APの設置高さについては、カメラの三脚を用いてコンクリート基盤底面より45 cmに統一した。なお、APの下面には15cm角のステンレス板(厚さt=5 mm)を敷いている。実験は、Table 2に示すAP配置ごとに無線LAN端末(Photo 7)の設置座標に対する測位座標(10分間の計測)のばらつきを計測した。Photo 8には、位置管理システム(三角測量方式による座標管理)を用いたトンネル内での計測状況を示す。なお、計測時のトンネル内の温度は18℃、相対湿度は85%であった。

4.2 実験結果と考察

1) 通信速度および通信遅延

Table 3 に小断面トンネル内における無線LANの通信速度と通信遅延に関する測定結果(配列1について各10回測定)の一覧を示す。

通信速度は、端末やケーブル等によって影響するものと考えられるが、本実験においては平均8.5Mbps(変動幅:6.4~12.8Mbps)であった。

また、小断面トンネル内における通信遅延は、平均で44.2msec(変動幅:34.4~56.7msec)であった。本ケースの最大通信遅延は56.7msecで、一般に要求される通信遅延150msec未満を満足しており、IP電話としての性能も満足しており、通信インフラとしての機能も有していることが確認された。なお、配列違いが測位結果に及ぼす影響はほとんど無かった。

2) 測位精度

長大かつ小断面トンネル内(800m区間)に無線LAN端末(Photo 7参照)を28台設置して、本システムを用いて測位した。代表的な座標既知($y=2.3$ m,

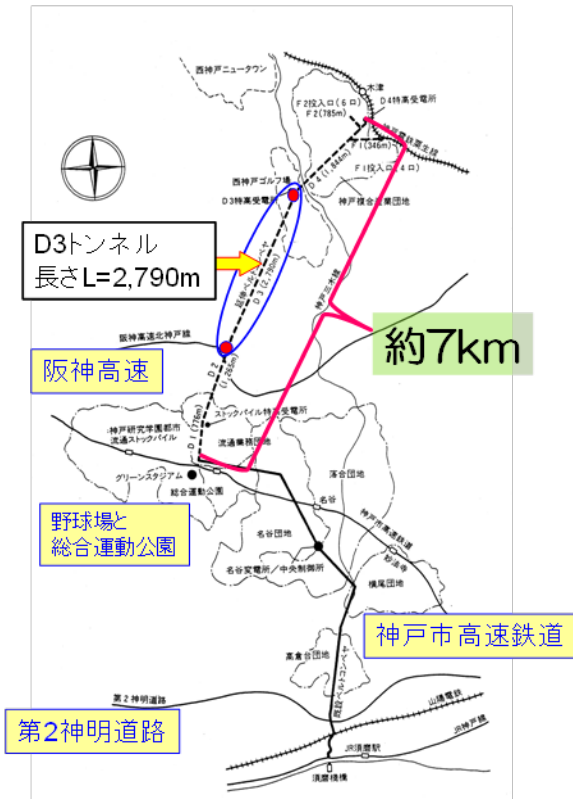


Figure 3: Plan view of belt conveyor tunnel (14 km) and location of D3 tunnel.

Table 2: Experimental Conditions on Arrangement Position of AP's

配列名	配列状態	軸方向の配置間隔 (m)	配置イメージ
配列 1	並行配列	100	
配列 2	千鳥配列 1	100	
配列 3	片側直線配列	100	
配列 4	千鳥配列 2	50	



Photo 5: View of the AP.



Photo 4: Inside view of D3 tunnel.

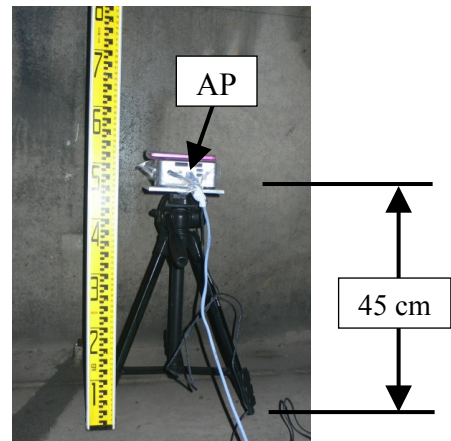


Photo 6: Setting condition of the AP.

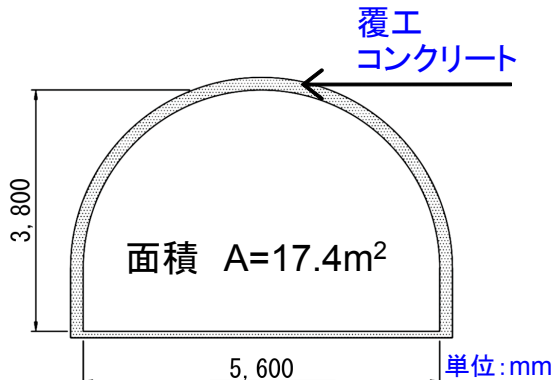


Figure 4: Cross section of D3 tunnel.

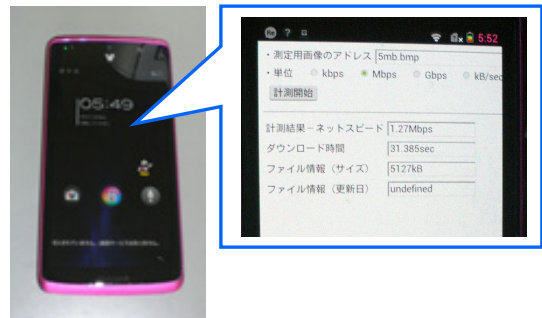


Photo 7: Mobile terminal and mobile terminal screen using in the experiments.



Photo 8: Measurement situation using the system.

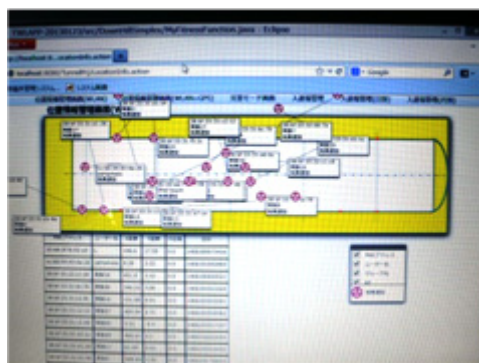


Photo 9: An example of experiment results.

$x=300.0$ m) を有する 1 台の無線 LAN 端末に関する測位結果を Table 4 および Figure 5 に示す.

測位座標の精度は、測位解析の時間が増す (3 秒から 30 秒) につれて測位誤差のばらつきが小さくなり (各測位解析の平均値のばらつきが小さくなり)、測位精度の向上が見られる. 測位解析を 30 秒程度にした場合には、測位誤差はトンネル軸方向で $+2.5\text{m}$ 程度、トンネル断面方向で $+2.1\text{m}$ 程度であった.

また、リアルタイム性を重視して、測位解析を 3 秒にした場合の平均値のばらつきは、トンネル軸方向で $\pm 5\text{m}$ 程度、トンネル断面方向も $\pm 5\text{m}$ 程度は確保できている.

このことから、リアルタイム性が必要な場合には、測位解析 3 秒の平均値を用いた場合でも、 x, y 方向共に測位精度としては $\pm 5\text{m}$ 程度を想定しておけば良い. さらに、リアルタイム性より測位精度を要求される場合には、測位解析の時間間隔を長く取れば測位精度は向上することが確認できた.

例えば、測位解析 30 秒の平均値を用いる場合、測位精度としては $\pm 2.5\text{m}$ 程度まで向上させることが可能である. 加えて、今回の実験では、配列による測位精度への顕著な影響は確認できなかった. この点については、今後更なる検証を行う予定である.

以上より、地上で有効活用されている自動車のナビゲーション GPS の測位誤差は $\pm 10\sim 15\text{m}$ と言われていることから、本システムによる測位精度は実用性・有用性があることを、実大規模の長大かつ小断面トンネルを用いた実験で検証することができた.

5. おわりに

本論文では、開発システム (位置管理システム) の概要と測位精度検証実験や小断面トンネル内での通信速度および通信遅延測定実験の結果を示した.

iNMRC では、ほとんどの部屋において正確な滞在部屋および入退室時刻を得ることができた. また、AP の配置などから特定の部屋において課題が残ったが、AP の設置位置の変更などにより十分に解決できるものと考えられる.

また、神戸ベルトコンベアトンネルにおける長大かつ小断面トンネル内においては、強くマルチパスの影響を受けることも考えられたが、通信速度は平

Table 3: Experiment Results (speed etc.)

通信速度(Mbps)	12.8	7.9	8.4	8.6	8.8	7.2	9.2	8.2	7.2	6.4
通信遅延(ms)	56.7	23.1	51.3	55.5	45.3	48.0	44.8	47.4	35.6	34.4

Table 4: Variation in the Average Value of the Positioning Analysis Results

	無線LAN端末座標値	測定時間3秒間の各平均値のばらつき	測定時間10秒間の各平均値のばらつき	測定時間30秒間の各平均値のばらつき
y(横断)方向	2.3	5.04~1.35	2.8~0.1	2.1~0.8
x(軸)方向	300.0	305.9~295.4	304.8~299.4	302.5~300.3

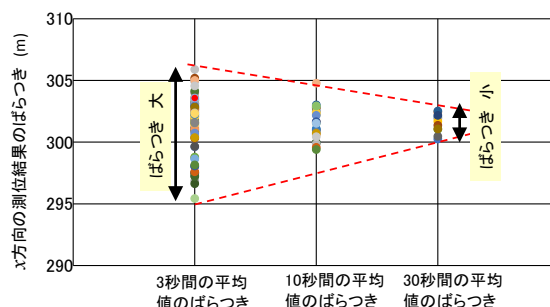


Figure 5: Variation in the average value of the positioning analysis results.

均で 8.5Mbps を確保できていると共に、通信遅延は 60msec 未満であった. このことから、通信インフラとして IP 電話の性能 (一般的には通信遅延は 150msec 未満) を十分満足していることが実証できた. 加えて、長大かつ小断面トンネル内における測位精度は、AP の配置方法 (並列配置、千鳥配置など) による影響はほとんどないことを実験的に確認した. また、測位解析を 30 秒程度に設定した場合には、測位誤差は $\pm 2.5\text{m}$ 程度は確保できることが確認できた. 自動車のナビゲーション GPS の測位誤差より小さくなることが分かった. 今後は、リアルタイム性と測位精度に関する要求性能を満足するような、測位解析時間等を検討していくことで、想定している ILC 施設への適用も十分可能であることを確認できた.

本論文では、測位センサネットワークを応用した

放射線管理・防災システムの全体概要と、その基本システムである位置管理システムの開発および実験状況について示した。

今後は、ILC 施設への適用に向けて、iNMRC での加速器稼働時の電波ノイズの測位精度への影響、AP の放射線に対する耐性を検証する。また、神戸ベルトコンベアトンネルでは、トンネル断面の中央部に厚い遮蔽コンクリートを有する構造の場合等における AP 配置の検討など、さらに検討を進める予定である。

謝辞

トンネル内での実験については、神戸市みなと総局の方々に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 榑泰直; 中村直樹, 吉川博; 上田晋司, “J-PARC LINAC 用高速インターロックシステムの設計”, Proceedings of 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.467-469, 2003.
- [2] 松田浩朗, 松元和伸, 田頭茂明, “無線 LAN 測位の測位精度に関する研究”, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.549-550, 2012.
- [3] S. Tagashira, Y. Kanekiyo, Y. Arakawa, T. Kitasuka, and A. Fukuda, “Collaborative Filtering for Position Estimation Error Correction in WLAN Positioning Systems,” IEICE Trans. on Communications, Vol. E94-B, No.03, pp. 649—657, 2011.
- [4] 川端康夫, 松田浩朗, 松元和伸, 小林薫, 田頭茂明, 大場俊幸, 吉岡正和, “加速器施設における測位センサネットワークに基づく放射線管理・防災システムの開発”, 第 11 回日本加速器学会年会, 2013, 8
- [5] 伊藤誠悟, 河口信夫: アクセスポイントの選択を考慮したバイズ推定による無線 LAN ハイブリッド位置推定手法とその応用, 電気学会論文誌 C, Vol.126, No.10, pp.1212-1220, 2006.