

組込技術を用いた高機能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第2報)

— 超音波位置計測システムの精度向上 —

田畑 克彦 久富 茂樹 岩井 俊昭*

遠藤 善道 西田 佳史**

Development of a New Wireless Sensor System using Embedded Technology (2nd Report)

- Improvement of the measured Precision of Ultrasonic Positioning System -

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Toshiaki IWAI*
Yoshimichi ENDO Yoshifumi NISHIDA**

あらまし 本研究では、無人搬送車(AGV)への応用を想定し、屋内外によらず、容易に経路変更が可能なナビゲーションシステムを実現する超音波位置計測システムを開発している。本年度はシステムの信号増幅率を上げることで、ランドマーカの計測範囲を5mまで拡張したシステムに変更した。しかしながら、ソナーシステムから送信されるフェーズドアレイで合成された探索信号が強いため、壁やランドマーカで反射した信号をソナーシステムが誤検知して、計測位置の精度劣化を招くことが判明した。この改善策として、探索信号が長距離伝搬して減衰した後にランドマーカが応答する長遅延応答手法と、ランドマーカまでの距離に応じてフェーズドアレイの探索信号強度を制御する手法を考案した。本手法によって、壁などによる多重反射信号の誤検知を抑え、位置計測精度が改善した。

キーワード 超音波センサ、フェーズドアレイ、位置計測システム、無人搬送車(AGV)、組込技術

1. はじめに

現在、コストダウンや省力化のために製造現場内の搬送を目的とした無人搬送車(以下、AGV)が実用化され、商品化されている。しかしながら、現状のAGVの経路走行(ナビゲーション)システムは経路変更の自由度が低いか、自由度が高いシステムは高価になるという課題があった。そこで我々は、経路変更が容易で、しかも低価格な新しいナビゲーションシステムの実現を目指し、それに供するための位置計測システムの研究開発^[1~3]に取り組んでいる。

本センサシステムは、ルート設定用のランドマーカ(以降“マーカ”と記す)として、磁気テープなどの代わりに超音波センサを使用し、AGVに搭載された超音波センサアレイシステム(以降“ソナーシステム”と記

す)は、特定のマーカを順次識別し、マーカとの相対位置を計測しながら、設定した経路を走行する。

実用化にあたって、超音波センサで課題となる雑音が弱いとされる課題については、以下の2点の対策を施している^[1]。

- ・フェーズドアレイ技術を利用し、超音波素子アレイで任意の方向へ強い超音波を送信し、SN比を向上させる
- ・経路上に配置したランドマーカに固有情報(以下、“ID”と記す)を割り当て、該当するIDを受信した時のみ応答させることで、他マーカからの信号と混信させない双方向通信を行う

したがって、従来システムのように超音波素子単体を用いて超音波信号を送信し、障害物からの反射信号を複数の超音波素子で受信し、環境マッピングする手法とは異なるシステムである。

昨年度までの研究^[1~3]により、マイコンやFPGAを用いて実用機に近いソナーシステムとマーカからなる位置計測システムの原理モデルを開発し、近距離における基本仕様(位置精度、位置推定頻度等)の把握を行った。

本年度は、遠距離推定が可能なシステムに改良し位置

* 国立大学法人 東京農工大学大学院 生物システム
応用科学府

** 独立行政法人 産業技術総合研究所
デジタルヒューマン工学研究センター

計測実験を行ったが、誤検知による位置推定精度の劣化が確認された。原因として、ソナーシステムに搭載された素子アレイにより生成される探索信号が強いために、この信号が壁で反射し、マーカーからの応答信号が混信することを確認した。

そこで、これらの反射信号の影響を抑制するための対策を施し、性能改善を試みた結果、反射信号による誤検知などの悪影響が抑えられ、マーカーの位置計測精度が改善されたので報告する。

2. 超音波位置計測システム

図1に、試作したソナーシステムとマーカーを示す。以降で説明するマーカーの位置計測プログラムをマイコンボード(プロセッサ, STM32F103ZE)及びFPGAボード(FPGA, XC3S1200E)に実装した。使用した超音波センサ素子には送受信ともに、日本セラミック株式会社のAT40-10PB3を使用した。ソナーシステムとマーカーとの相互通信の仕様としては、ID信号長を7bit, 通信速度を625bps^[1]とした。マーカー位置の計算方法については、以降に示す。

2.1 マーカー方位角 θ_{MK} の計算

マーカー方位角 θ_{MK} は、左右受信センサの受信時間差を計測することにより、次式を用いて推定する。

$$\theta_{MK} = 90 - \cos^{-1}\left(\frac{dl}{\ell_{RL} - \ell_{RR}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{dl}{\ell_{RL} - \ell_{RR}}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\theta_{MK}=0^\circ$ の時にマーカーが正面存在しているとして、 $\ell_{RL}-\ell_{RR}$ は受信素子間の距離、 dl はマーカーから左右の受信素子間の行路差であり、

$$dl = c \cdot dt \quad (2)$$

で表される。ゆえに、左右受信素子の信号到達時間の差 dt を測定することで、マーカーの方位角を推定する。

この実験において、(1)式および(2)式の角度分解能を決めるパラメータであるサンプリング周期を10 μ secに、左右受信素子間の距離 $\ell_{RL}-\ell_{RR}$ を81.28mmに設定した。

2.2 マーカーまでの距離 ℓ の計算

左右受信素子からマーカーまでの距離 ℓ_{Right} と ℓ_{Left} は、

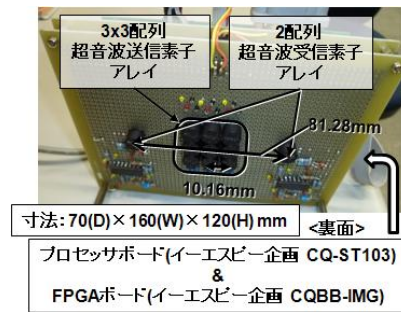
それぞれ次式より算出できる。

$$\ell_{Right} = \frac{c}{2} \cdot (t_{R_flight} - t_{process}) = \ell \pm \frac{dl}{2} \quad (3)$$

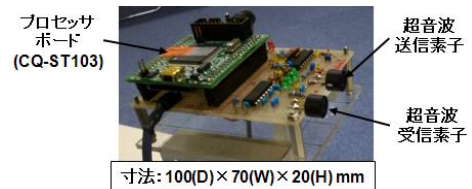
$$\ell_{Left} = \frac{c}{2} \cdot (t_{L_flight} - t_{process}) = \ell \mp \frac{dl}{2} \quad (4)$$

ここで、 t_{R_flight} と t_{L_flight} は、それぞれ左右受信素子について超音波信号が往復するのに要する時間である。また、 $t_{process}$ はマーカーのID認識に要する時間であり、一定の応答遅延となるように設計する。ここで、 ℓ は左右受信センサを結ぶ線分の中点からマーカーまでの距離で、 $dl/2$ は左右受信素子の中点を基準とした場合の行路長のずれ量である。

(3)式と(4)式の平均値を計算すると、 $dl/2$ が消去され、マーカーまでの ℓ を求めることができ、二つの受信素子で検出することにより、誤差の影響を小さくできる。方位と距離を計算するため、パルスが到来したと判定するタイミングは、送受信パルスの最大値の50%に設定した閾値を超えたタイミングで計算する。

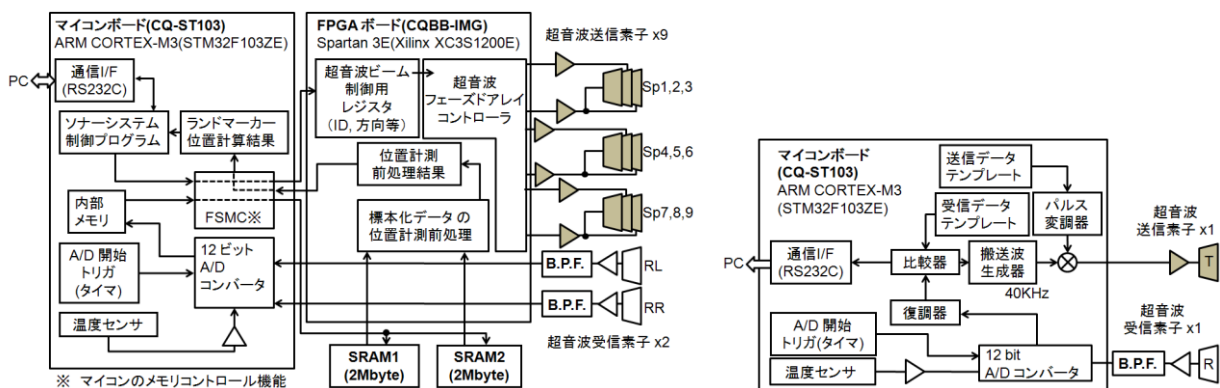


(a) ソナーシステム (試作機)



(b) ランドマーカー (試作機)

図1 超音波位置計測システム



(a) ソナーシステム (試作機)

(b) ランドマーカー (試作機)

図2 機能ブロック図

2. 3 超音波位置計測システムの動作

超音波位置計測システムの動作について簡単に述べる。無人搬送車の走行システムを想定した位置計測データ取得用PCにより、探索するマーカーIDをソナーシステムに通知する。ソナーシステムに搭載されているマイコンがそのIDを受信し、探索ビーム方向をFPGAに通知する。FPGAは、送信素子アレイを並列駆動し、指定された方向へフェーズドアレイによって合成された探索信号を照射する。このビームはID情報を含んでおり、2値デジタル振幅変調(ASK)されている。さらに、FPGAはマイコンから左右受信素子が受信する信号のAD値を10 μ secのサンプリングレートで取得し、約10m先のマーカーを計測可能とした82msecの間の超音波受信信号データを保存した後、マーカーからの応答信号のID識別^[1]と前述の位置計算のためのタイミングを計測する。マイコンはこれらの情報を元にマーカー検出の有無と、検出が成功した場合の距離 ℓ と方位角 θ_{MK} の位置計算を行い、PCに出力する。

また、マーカーは超音波受信素子が受信した超音波信号に対して逐次信号処理を行いながら、割当てられたIDが到来するのを待つ。そして、割当てられたIDが到来した場合、一定の応答遅延 $t_{process}$ 後にID毎に割り振られた固有の応答信号を送信する。

以上の機能を実現した超音波位置計測システムのブロック図を図2に示す。送信素子アレイについては、フェーズドアレイ技術によるビーム走査と、後述する超音波送信素子数を制御する手法を実現するため、送信素子9個に対して6系統の独立した超音波送信回路を有する。

3. 遠距離計測実験と精度劣化要因

本位置計測システムは10m離れたマーカーを計測できることを目標としているため、予備実験により信号増幅率を設定した。この結果、昨年度に比べ大きな増幅率を設定した。また、前述のように本位置計測システムは計測可能距離を設定し、その距離を超音波が伝搬する時間分の受信信号振幅データをメモリに保存してから位置計算する方式である。このため、同じ計測可能距離を設定した場合、前述の応答遅延 $t_{process}$ が短いほどデータ取得時間も短くできるので、位置推定の所要時間も短縮できる。そこで、システムが許容できる最短の応答遅延 $t_{process}$ として13.1msecを設定した^[1]。

1個のマーカーの位置（距離 ℓ 及び方位角 θ_{MK} ）を変えるごとに、ソナーシステムから200回の探索信号を送り、マーカーの位置計測を行った。位置計測実験の測定条件を表1と図3に示す。

図4は、マーカー方位角 $\theta_{MK}=30^\circ$ 一定として、距離 ℓ を500~5000mmの位置に設置した時に位置計測を行い、計測した位置の頻度を2次元ヒストグラムで表したグラフである。同図のグラフ原点にソナーシステムが設置されているとしている。1マスは50mm \times 50mmの領域であり、その領域内の位置を推定した回数を数数する。計測頻度の分布が集中して、より高い数値となる方が安定した精

表1 遠距離測定実験条件

実験条件	
部屋配置は図3(a)のとおり	
室温	20 $^\circ$ C
超音波伝搬速度	344 m/sec (at 20 $^\circ$ C)
システム条件	
マーカー探索回数 Ns	200 times
探索信号	7bit "1100100"
応答信号	7bit "1100101"
ランドマーカー配置位置	
ランドマーカーまでの距離 ℓ と方位角 θ_{MK} の定義は図3(b)のとおり	
距離 ℓ [mm]	500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000
方位角 θ_{MK} [$^\circ$]	0, +10, +20, +30, +40, +50

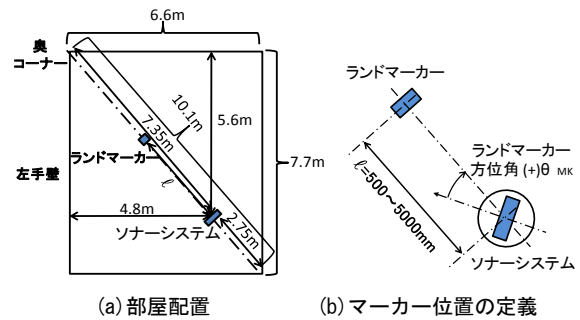


図3 遠距離計測実験

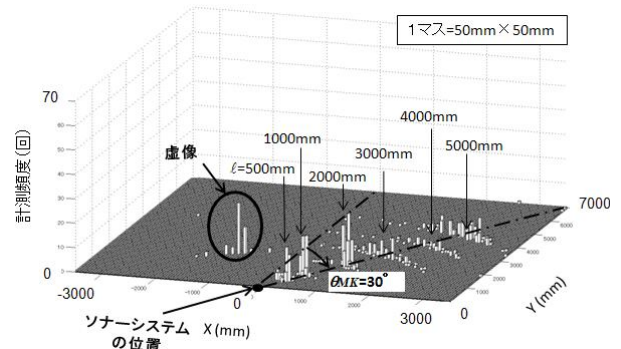


図4 最短応答遅延時の位置計測結果 ($\theta_{MK}=30^\circ$ 一定)

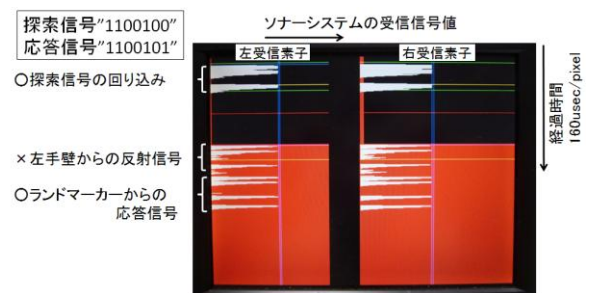


図5 誤検知時の左右受信信号波形 ($\ell=4000\text{mm}$, $\theta_{MK}=50^\circ$)

度で計測できていることを意味する。

図4より、マーカーまでの距離 ℓ が3000mm以上から方位角方向の計測値が広く分布しており安定した計測ができていないことが確認できる。

また、図中のソナーシステムから見て左手側に虚像が発生している。この虚像はマーカーまでの距離 ℓ が4000mmの時に発生している。設定した応答遅延(13.1msec)中に超音波が伝搬する距離は、室温20 $^\circ$ Cの環境下において、4.5mに相当する。このため、反射信号であ

ると仮定して距離換算すると $l_{MK}=2.25m$ となる。虚像の距離 l_A は2.5m程度であるため、マーカーからの応答信号と探索信号の反射とがタイミング的に重なり、ソナーシステムが誤検知して虚像が発生したものと考えられる。この場合、反射源の距離 l_{ref} は l_A+l_{MK} となり、4.75m程度となる。図3(b)で定義される方位角 θ_{MK} が 30° であるのでソナーシステムは反時計回りに回転しており、反射源(虚像)の方位はさらに $-\theta_{MK}$ (左手)方向であることから、反射源は同図(a)の実験配置より左手壁であると特定できる。

図5は誤検知時において、ソナーシステムの左右の受信素子が受信した信号波形をモニターに表示した写真である。モニターの縦方向が時間で、横方向が信号振幅を表している。左手壁からの反射信号とマーカーからの応答信号の最初のパルスが連結されて、応答信号と同じパルス列となったため、誤検知している様子が確認できる。

以上のことから位置計測精度の向上においては、多重反射信号の影響をどの程度抑制できるかが重要となる。

4. 位置精度向上手法の検討

多重反射信号の影響を抑制するため、本年度は二つの対策を施すことにより、精度向上を試みた。その基本的内容について述べる。

4.1 ランドマーカーの長遅延応答

本システムが超音波信号の双方向通信を行うという特徴を活かし、マーカーの応答遅延を長く取ることでシステム性能の改善を試みる。図6(a)は、室内を天井側から見た概念図で、ソナーシステムがマーカーに対して探索信号を照射している。マーカーの応答遅延を長くすると、図6(b)に示すように壁で直接反射した探索信号がすでにソナーシステムを通過して、マーカーからの応答信号と同時に受信しないか、探索信号の伝搬減衰や反射吸収により減衰する。これにより、応答信号を確実に捉え、反射信号によるシステムへの悪影響を抑制できると考える。この伝搬減衰や反射吸収による長遅延応答手法の考え方は、反射物などの配置などの環境に対してロバストであり、システムへの実装が容易なため、有用な手法と考えられる。

今回は予備実験により、探索信号強度が約1/3に減衰する距離を確認し、遅延応答時間を34.2msecに拡大した。この値を設定した理由としては、前述したようにパルスタイミングの判定方法が最大受信信号値の50%を超える値を基準としているので、探索信号の反射の影響を抑えることができると考えたためである。

4.2 駆動する超音波送信素子の制御

マーカーが近距離に存在する場合には、探索信号が強すぎるために、ソナーシステムとマーカー間で信号の反射を繰り返し、実際の距離の数倍となって計測されることが判明した。また、信号が強すぎるとマーカーの受信パルスが飽和し、その飽和度に依存して応答信号送

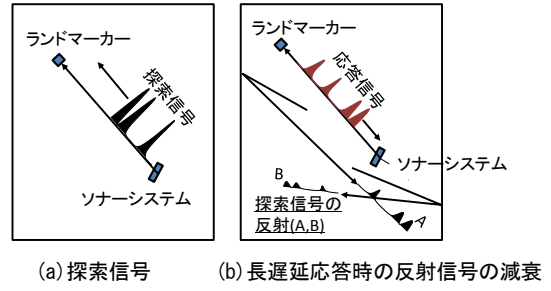


図6 長遅延応答による精度向上手法

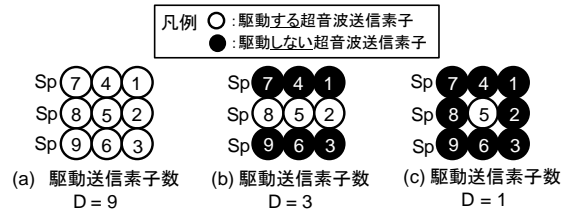


図7 探索信号強度制御手法

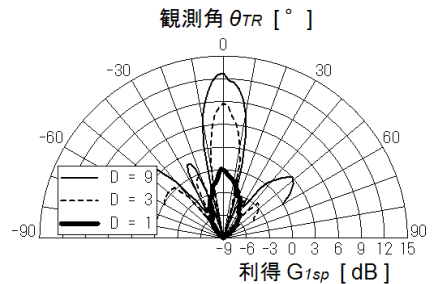


図8 駆動送信素子数Dとビームパターンとの関係

信タイミングがずれるため、距離精度の劣化にも繋がる。このため、近距離時に探索信号の強度を低下させることができれば、精度向上が期待できる。本システムが送信素子アレイを用いている特徴を活かし、駆動する送信素子数Dを変更する手法を考案した。具体的にはマーカーまでの距離 l が短くなるに従い、図7に示す駆動する送信素子数Dを9個、3個または1個に減少させることにより、ソナーシステムから送信される探索信号強度を制御する。本システムの送信素子アレイにおいて、メインビーム角 $\theta_0=0^\circ$ とした時の駆動する送信素子数Dとビームパターンを図8に示す。ここで、駆動する送信素子数Dが1の時は、物理的にフェーズドアレイによるビーム走査は行えない。

距離 l と駆動する送信素子数Dの関係については、 l を変化させてDを9個、3個または1個としたケースでそれぞれ位置計測を行い、 l に応じて最も精度が得られるDを把握した。

5. 改良システムによる位置計測実験

前章で述べた手法を図2に示すシステムに実装し、第3章と同様の実験を行った。図9(a)に4.1節で述べたマーカー

一の長遅延応答手法による位置計測結果を、図9(b)に長遅延応答に加え、4.2節で述べた送信素子数Dを制御した手法の位置計測結果をそれぞれ示す。

図9(a)の長遅延応答手法の結果から、最短遅延時に発生していた図2中の虚像が消滅しており、計測位置の散らばりも目に見えて減少していることが確認できる。さらに、図9(b)では、計測位置の精度向上による計測値の集中により50mm×50mmの同グリッド内で計測される頻度が増し、真値付近に鋭利なピークが出現していることが確認できる。

図10は従来手法と今回の改良手法について、距離と方位角計測を比較したグラフである。グラフは上下2段で表現されており、上段が計測距離の平均値を表し、下段がその標準偏差を表している。

同図からも従来手法と比較して精度が改善されていることがわかる。また、送信素子数を制御することにより、マーカが近距離に存在する場合における精度も大幅に改善されていることが確認できる。これにより、距離方向については目標値である5mまでを標準偏差50mm以下(1σ)の精度で計測することができた。

しかしながら、図9ならびに図10(b)から、長距離5m付近では、計測した方位角の散らばりが大きくなっていることがわかる。これは距離が近くなり、方位角が大きくなるケースでも同様の傾向を示しているため、応答信号強度が低下し、SN比が低下することによる精度劣化であると考えられる。今後の課題としては、方位角の計測精度を向上させることが残されている。

6. まとめ

超音波フェーズドアレイ技術と双方向通信技術により、長距離計測が可能な位置計測センサシステムを開発し、位置計測実験を行った。この結果、フェーズドアレイによる合成信号が強力なため、室内の壁などの構造物で反射した信号が、誤検知などによる精度劣化を招くことが明らかになった。そこで、反射信号による影響を抑え精度向上を実現する手法として、長遅延応答手法と、駆動送信素子数の制御手法を考案した。これらの手法を試作システムに反映し、実験を行った結果、精度が改善され、距離5mで方位角 $\theta_{MK}=30^\circ$ までは目標標準偏差の50mm以下を達成できた。今後は方位角精度を高める手法を開発する予定である。なお、最大計測距離については当面は5mとし、位置計測精度向上を優先した開発を行う。

文献

- [1] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文誌vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [2] 田畑克彦, 岩井俊昭, 西田佳史, 久富茂樹, 遠藤善道, 超音波センサアレイを用いたナビゲーションシ

ステム -基本システムの開発とランドマーカの位置推定実験-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2012講演論文集, 1P1-A10, 2012.

- [3] 田畑克彦, 岩井俊昭, 西田佳史, 久富茂樹, 遠藤善道, 水野渚, 横山哲也 “組込技術を用いた高機能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第1報) -超音波センサアレイによるナビゲーションシステムへの適用-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.13, pp.1-6, 2012.

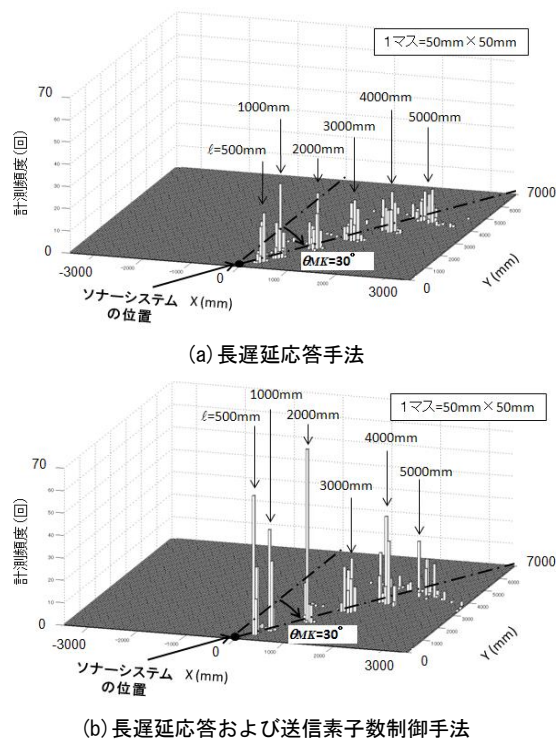


図9 改良システムによる位置計測結果 ($\theta_{MK}=30^\circ$ 一定)

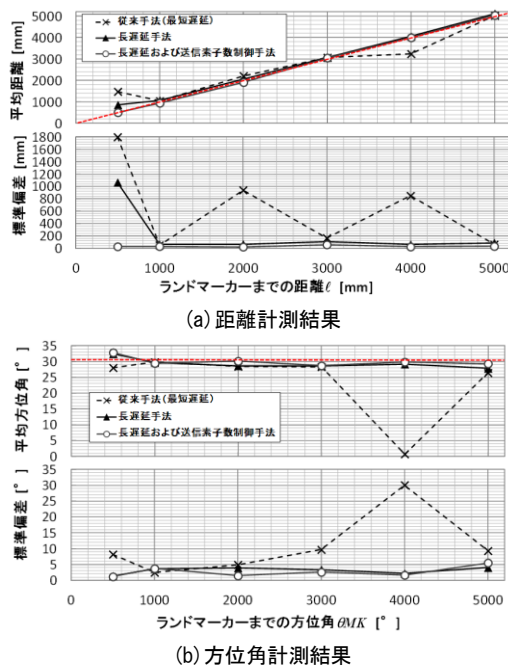


図10 位置計測精度の比較 ($\theta_{MK}=30^\circ$ 一定)