

文部科学省 量子科学技術委員会(第6回)

調査項目: 量子計測・センシング・イメージング

量子レーダーの研究動向と 今後の戦略

平成28年10月7日(金)
於 文科省

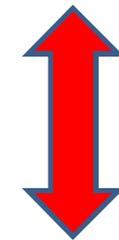
- 玉川大学・量子情報科学研究所
 - OQIT研究所
- 廣田 修

センサー技術のパラダイムシフトへ向けて(原理)

エンタングルメントの活用

[A] 巨視的エンタングルメント現象

- Two mode squeezed light
- H -state

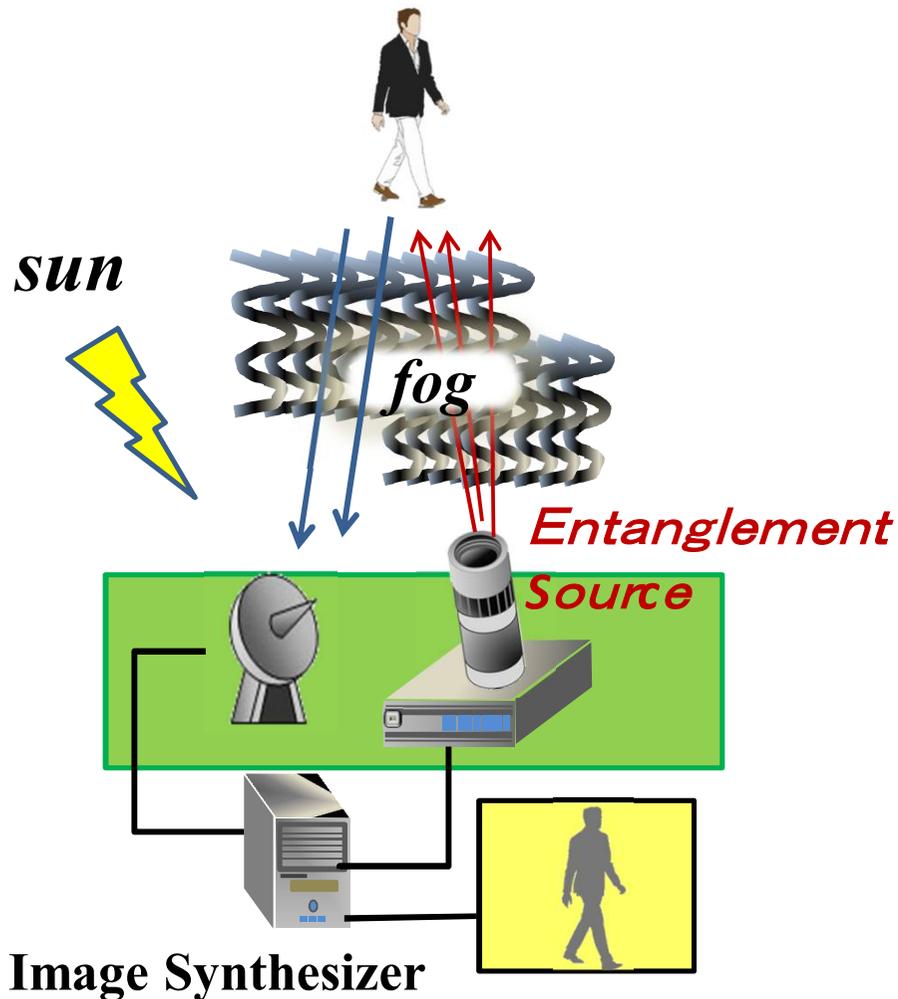


融合

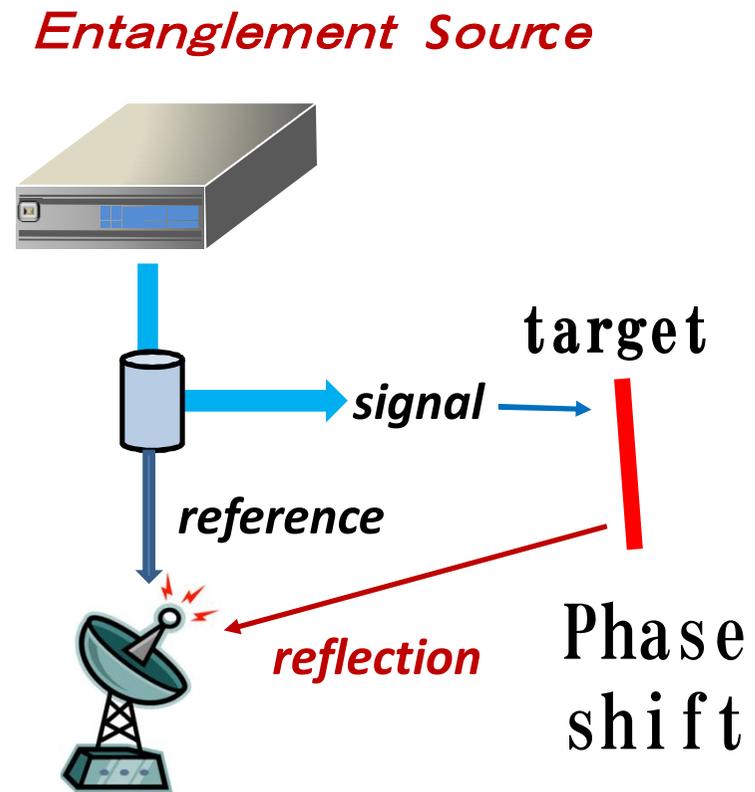
[B] Wiener型量子通信理論

センサー技術のパラダイムシフトへ向けて(目標)

[1] 量子レーダーカメラ



[2] 超高感度センサー



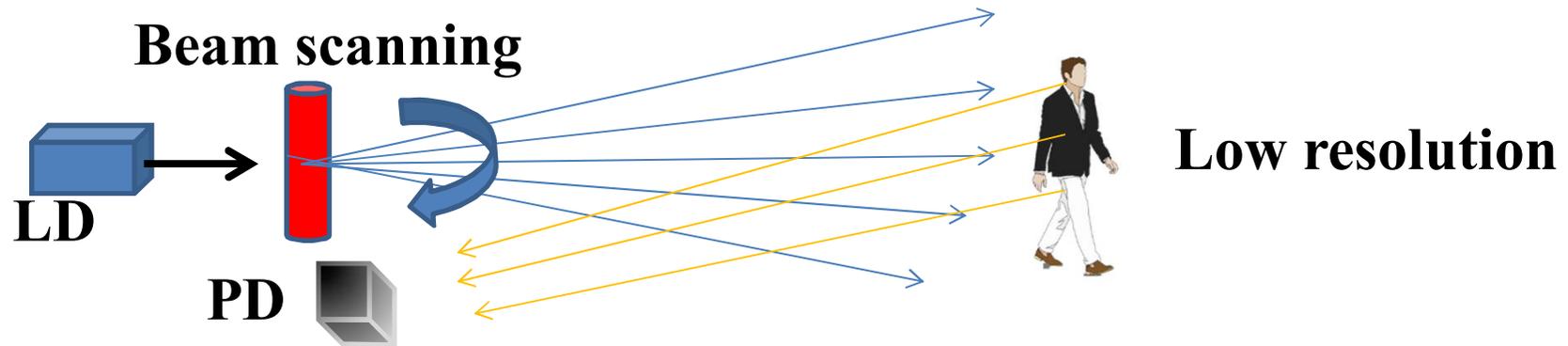
[1] 量子レーダーカメラ

目的 自動運転機能をサポートする
センサー技術

特徴 **悪天候**や晴天時の**逆光**に対して、
その影響を受けることなく
自動車の周辺の画像を認識する

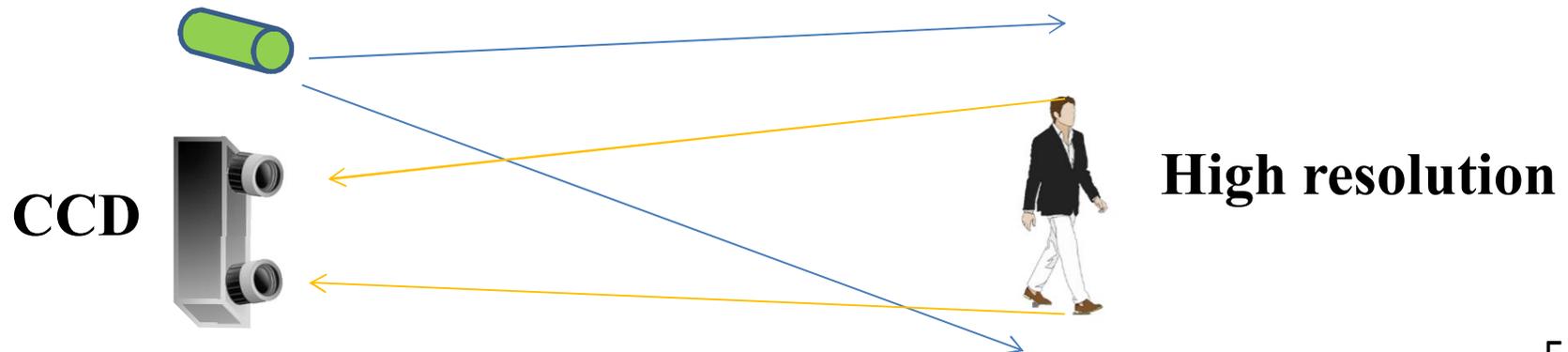
自動車用イメージセンサーの既存技術

◆ Lidar (light detection and ranging system)



◆ Stereo Camera

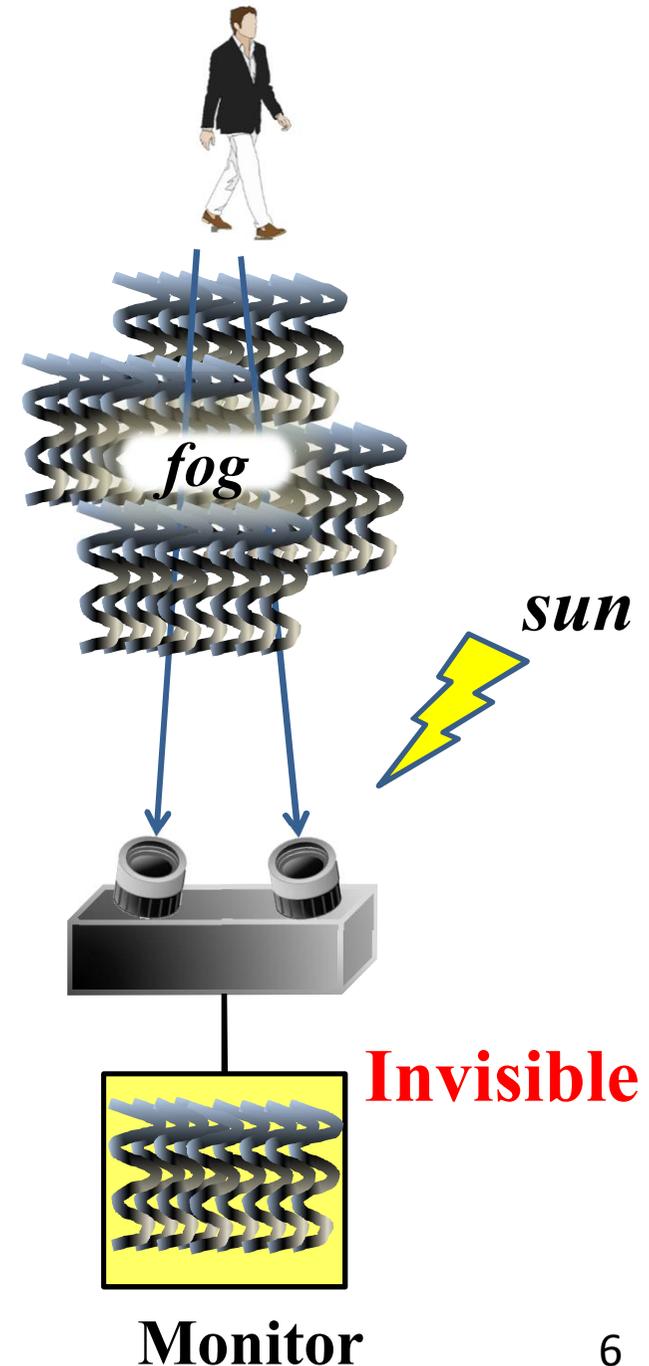
Head light (Halogen lamp, LED, et al)



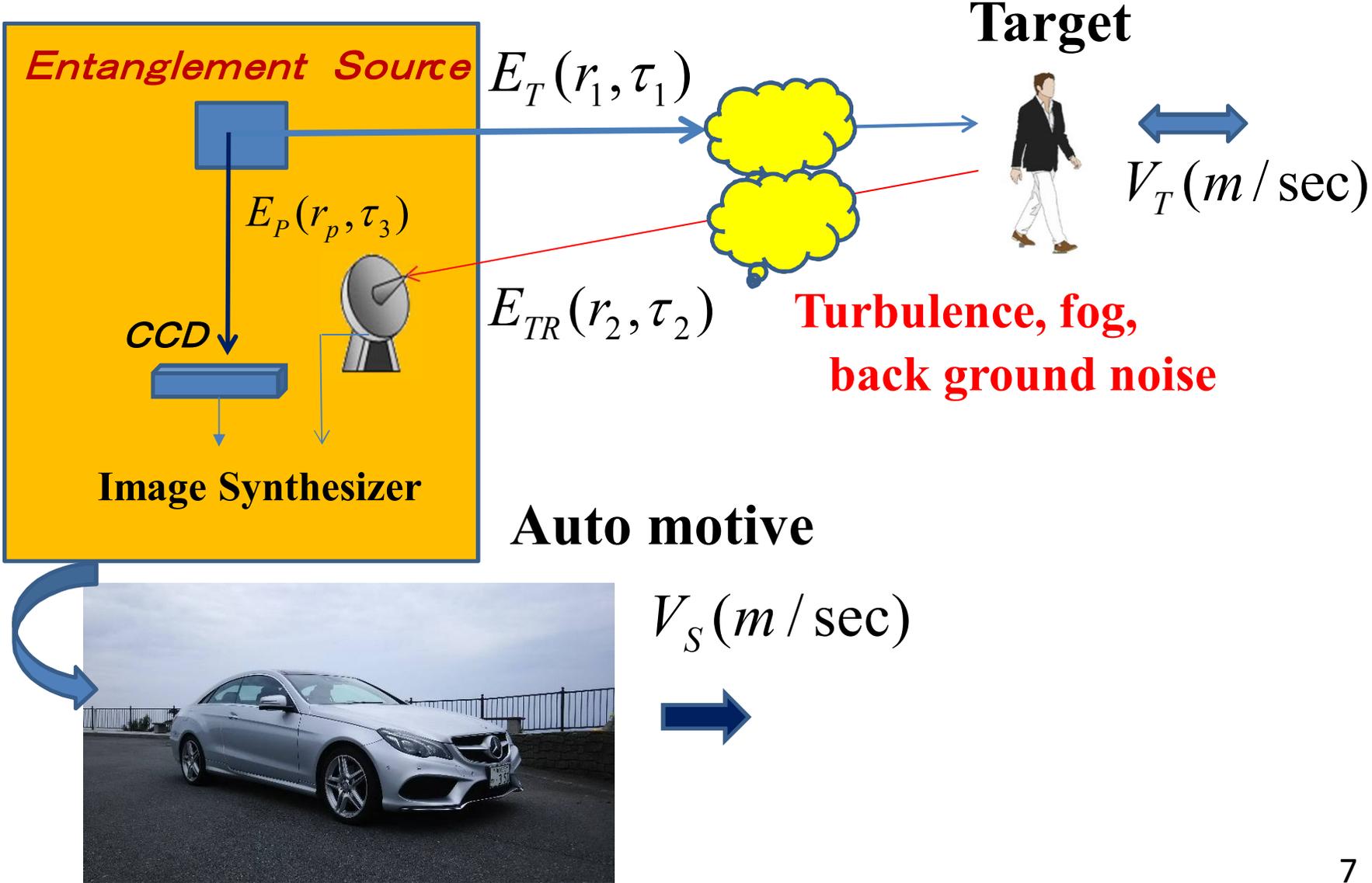
◆ステレオカメラの欠点

Stereo camera cannot image the target under fog, turbulence, background noise, and back light (sun).

霧の中での自動運転の実験からカメラでは歩行者の検出が難しいことが報告されている。



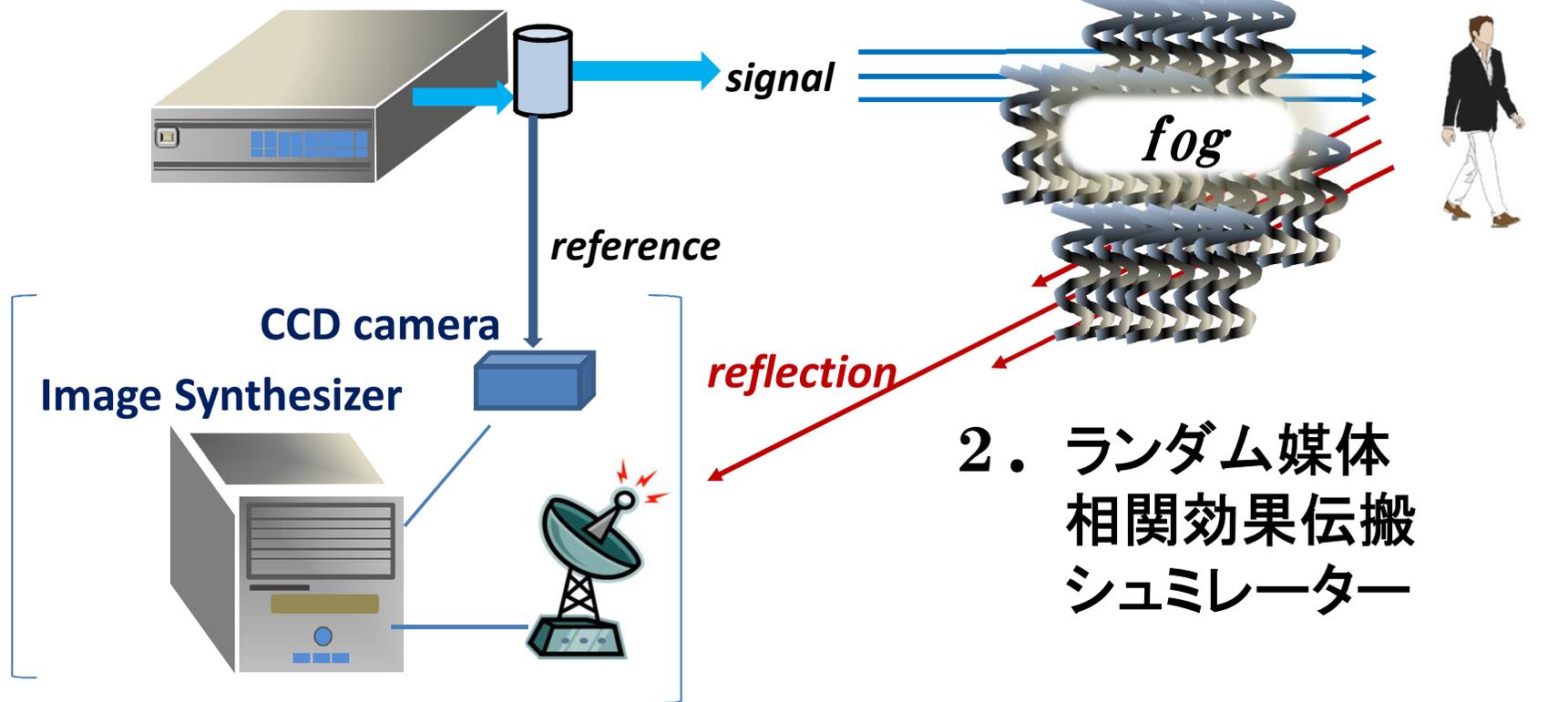
量子レーダーカメラの構成モデル



量子レーダーカメラの基盤技術

1. 光源

Two mode squeezed light



2. ランダム媒体
相関効果伝搬
シュミレーター

3. 受信機技術

Quantum Wiener Receiver

基盤技術の理論的背景

1. 光源 : High Power Two-mode Squeezed Light

$$|\Psi\rangle_{1,2} = \frac{1}{\cosh r} \sum_n e^{-n\varphi} \tanh^n r |n\rangle_1 |n\rangle_2$$

$$\langle n_1 \rangle = \langle n_2 \rangle = \sinh^2 r \gg 1$$

2. 相関効果伝搬シュミレーター:

Generalized Huygens-Fresnel Principle

$$E'(r', t) = \int E(r, t) \frac{k_0}{i2\pi L} \exp\left\{ik_0\left(L + \frac{(r' - r)^2}{2L}\right)\right\} \exp\{\psi(r', r, t)\} dr$$

$$\psi(r', r, t) = \text{Re}\psi + \text{Im}\psi : \text{Non-stationary random process}$$


3. 受信機技術 : Quantum Wiener Receiver

開発の期間推定

➤ 基盤技術の研究開発（2016年開始）

	半量子	完全量子
光源	2～3年	7～10年
相関効果伝搬 シュミレーター	2～3年	2～3年
受信機技術	2～3年	7～10年

➤ システムの研究開発（2018年開始）

半量子レーダーカメラ	3～5年
完全量子レーダーカメラ	7～12年

量子効果を用いるその他の方式と性能

➤ システムの比較

	機能	特徴
Quantum Illumination	ターゲットの存在の検知	背景光に対する耐性を持つ
Quantum Reading	ターゲットの変化の検知	外乱のない環境で超高感度
Quantum Ghost Imaging	ターゲットの画像の認識	外乱に耐性を持つが静止ターゲットのみ

➤ 上記の実現技術の比較

光源	機能
微視的量子効果（単一光子）	実効動作距離が数センチ
巨視的量子効果	実効動作距離が数メートル～数十メートル

出口と展開可能性

- 各種レーダー・人工知能との融合を経て、全天候対応の自動運転車の実現や超高感度監視カメラ実現に貢献



装着イメージ

2020年～2030年

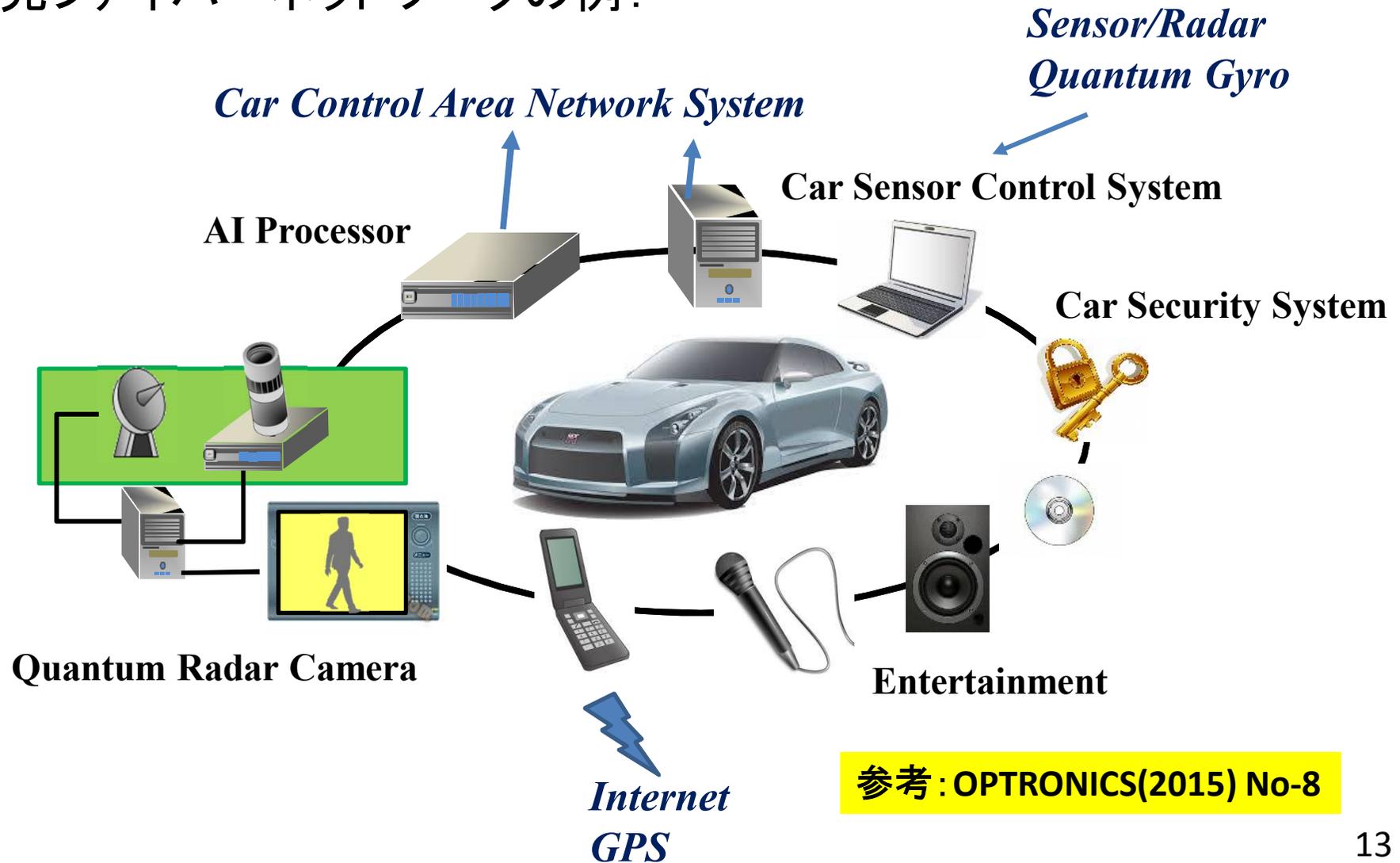
- 日本の本技術を世界標準化



- 小型化と量産化：市場は1兆円規模（日立製作所試算）

➤ 車内の高速ネットワークの開発と連携し,さらなる進化

1 Gbit/sec~10 Gbit/sec対応の車内インフラ用
光ファイバーネットワークの例:



[2] 超高感度センサー

目的 標準量子限界を超えるセンサー
技術の開発

特徴 H -stateとHelstrom受信機や
その他の量子受信機との融合

H -state の理論的背景

Quasi Bell Coherent State :

O.Hirota, Proc. of QCMC,
Plenum Press, 2001

$$|\Psi_1\rangle = h_1 \{ |\alpha\rangle_A |-\alpha\rangle_B + |-\alpha\rangle_A |\alpha\rangle_B \}$$

$$|\Psi_2\rangle = h_2 \{ |\alpha\rangle_A |-\alpha\rangle_B - |-\alpha\rangle_A |\alpha\rangle_B \}$$

$$|\Psi_3\rangle = h_3 \{ |\alpha\rangle_A |\alpha\rangle_B + |-\alpha\rangle_A |-\alpha\rangle_B \}$$

$$|\Psi_4\rangle = h_4 \{ |\alpha\rangle_A |\alpha\rangle_B - |-\alpha\rangle_A |-\alpha\rangle_B \}$$

$$\begin{aligned} E_{ent}(\rho) &= -tr(\rho_1 \log \rho_1) \\ &= -tr(\rho_3 \log \rho_3) \neq 1, \forall \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{ent}(\rho) &= -tr(\rho_2 \log \rho_2) \\ &= -tr(\rho_4 \log \rho_4) = 1, \forall \alpha \end{aligned}$$

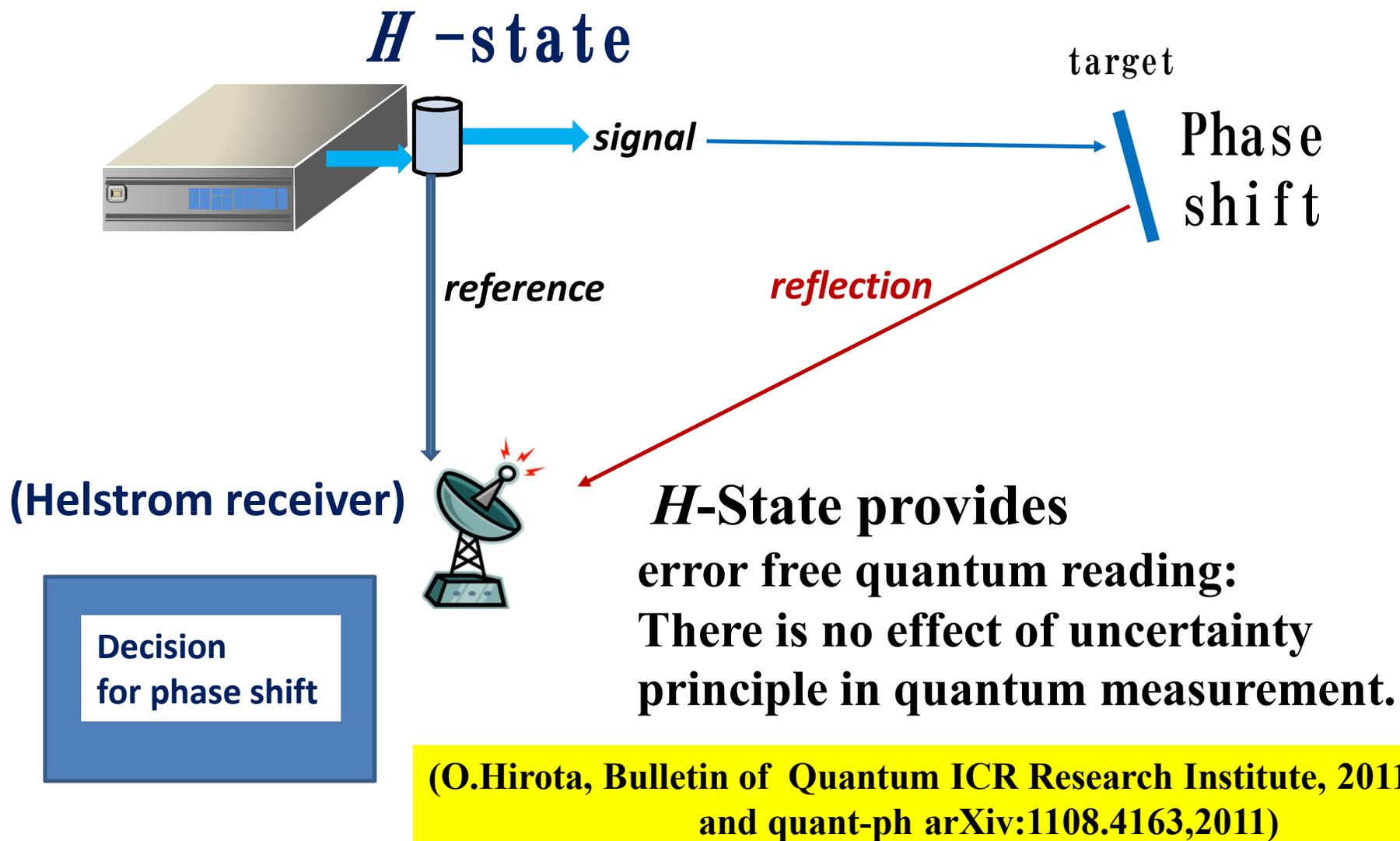
Complete Entanglement

$$|\Psi_2\rangle = H\text{-state}$$

$$|\Psi_4\rangle = H\text{-state}$$

S.van Enk, and O.Hirota, PRA , vol- 64, 2001,

エラーなし超高感度位相シフトセンサー



基盤研究

[A] *H*-stateの生成

➤ Van Enk-Hirota法:

Coherent State のCat Stateを生成しハーフミラーで合成

(S.van Enk and O.Hirota, PRA,vol-64,2001)

➤ Van Enk-Hirota-Mabuchi法:
Cavity QEDによる直接的な生成

(O.Hirota, S.van Enk and H.Mabuchi, Proc. of QCMC, Rinton Press, 2003)

[B] 高速Helstrom受信機の実現

➤ Dolinar法:

S.Dolinar, Tech.Rep.111, Research
Laboratory of Electronics, MIT, 1973

出口と展開可能性

エンタングルメント現象を基盤とする量子物性科学と量子光学の発展を促すとともに、科学技術に基盤となる計測・解析技術を飛躍的に向上させる。

超高感度なセンサー技術の実現によって、金属研磨技術や生体機能の高精度読み取りによる診断・医療技術の革新を可能とする。

[3] 政策推進における課題

問題意識(文科省):

出口の具体化とともに、日本の強みを踏まえ、
如何なる推進方式が良いか

以下は提言
(量子センサー関係)



国内外の研究の特徴

➤ OQIT研究所, MIT

Shannon型量子通信理論



Wiener型量子通信理論

➤ 国内+国外(一般)

Shannon型量子通信理論

量子センサーに関する国内外の投資の動向・現状

国内	民間資金で進行中 (OQIT研究所+日立製作所など)
国外	米国: DARPAと陸海空軍研究所で開発中 その他: 出口が見える具体的な課題は見当たらない

米国のプロジェクト推進例

◆DARPA支援プロジェクト 合同シンポジウム

2003年11月 フロリダ

主要議題

- 量子コンピュータの
実現可能性
- 量子暗号の開発の可否



DARPA会議内容(2003)

量子コンピュータ・量子暗号などの
開発の方向性の議論・見極め(中間報告)

微視的量子効果

量子回路の
スケーラビリティ

量子鍵配送の
通信特性

結論

5~10年

一般プロジェクト
(多方面で分散研究)

巨視的量子効果

Y-00型物理暗号の
将来性

**量子センサー
開発の企画**

結論

5~10年

空軍研究所プロジェクトへ
(Northwestern大+MIT)
玉川大 招待講演として参加

◆米空軍研究所支援プロジェクト 合同シンポジウム

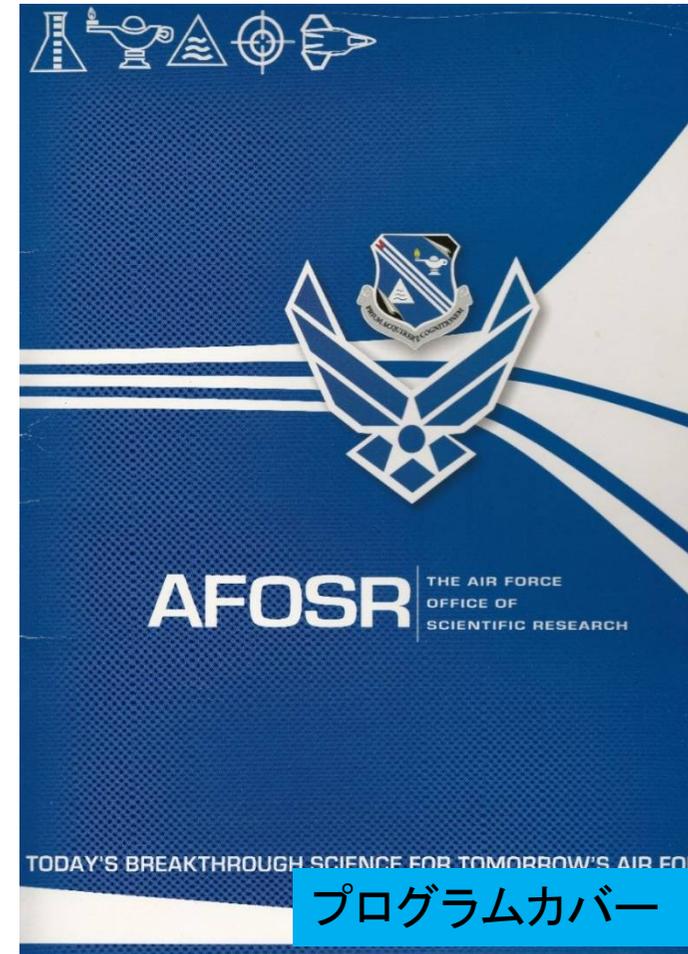
2008年3月 Dayton (Ohio州)

- Y-00型物理暗号の開発報告
- **量子センサー開発報告**

◆量子センサープロジェクト

DARPA 2007－2009年
「Quantum sensors program」

米国空軍研究所、MIT, Northwestern大学
(主要メンバー: H.P.Yuen, P.Kumar, J.H.Shapiro)



国防総省主導型研究開発

量子情報における日本の強み

日本発の国際会議の活用

- Osamu Hirota, 1990年 創設

Quantum Communication, Measurement and Computing (QCM&C)



1990年 第一回会議 (Paris, France)

- Hiroshi Imai, 2001年 創設

Asian Quantum Information Science (AQIS)

上記の世界の評価: 参考文献

C.H.Bennett, 大川賞受賞記念講演、大川情報通信基金2010年度 年次報告

民間主導型研究開発 = 多様性

日本の弱点

- 国内の電子産業と大学の連携による成功は、もはや過去の事の認識がない。日本が先端技術において優位性を有していない。
- 研究助成金が特定のグループに集中してしまう。

今後の方向性と課題

- 東大、京大、理研、NII, NICT, NTTなどの連携強化
- 大企業の基礎研究の復活を促す。
- 人材の有効活用と育成。

理学系研究者 → 基礎研究に専念
工学系研究者 → 基礎理論に挑戦

} 理・工融合系研究者の育成

まとめ：新局面に向け基盤研究の推進

(a) 主要な物理現象研究と数理研究との融合

- 量子エンタングルメント
遅延回路型量子エンタングルメント
Q-modeエンタングルメント
超電導、光格子系
- 量子コヒーレント制御
- スピントロニクス
- ボース・アインシュタイン凝縮
- Cavity-QED
- 人工原子
- ナノフォトニクス

**Wiener型量子通信理論
を活用**



量子状態の最適制御

- 量子計測(センサー、顕微鏡など)の設計
- 量子コンピューターの回路設計
(量子アニーリング型、量子デジタル情報処理型など)

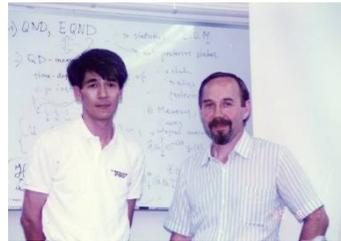
(b) 数理系基礎研究の推進と具体的活用

© Hirota

Shannon型量子通信理論の基礎研究

1960年～2000年

C.W.Helstrom
A.S.Holevo
H.P.Yuen
O.Hirota



A.S.Holevo,

A.S.Holevo, M.Sohma, O.Hirota,
PRA vol.59, no.3, pp.1820-1828, 1999.

A.S.Holevo, M.Sohma, O.Hirota,
Report on Mathematical Physics vol.46,
no.3, pp.343-358, 2000

応用研究

Y-00暗号,
量子エニグマ暗号など

Wiener型量子通信理論の基礎研究

1970年～2010年

R.L.Stratonovich
V.P.Belavkin
O.Hirota



R.L.Stratonovich, V.P.Belavkin

V.P.Belavkin, O.Hirota, R.Hudson,
Quantum Communication and Measurement, Plenum Press, 1995.

応用研究

量子レーダーカメラ、
量子ジャイロ、
などから
さらなる応用予言へ
重力定数変化検出、
確率動的制御システム