

# 从“识别”到“感知”： 基于RFID的可标记无源感知技术研究

报告人： 谢磊

[lxie@nju.edu.cn](mailto:lxie@nju.edu.cn)

南京大学计算机软件新技术国家重点实验室



1

**智能感知**

2

**RFID无源感知**

3

**小结**

# 智能感知计算



有一说一  
就事论事  
简单直接

低级阶段感知

融会贯通  
举一反三  
见微知著



高级阶段感知

**根本问题：如何从物联网智能感知计算的理论、方法和系统研究出发，有效提升智能感知计算的“泛化能力”，来进一步拓展感知范畴和探索感知极限？**

1

智能感知

2

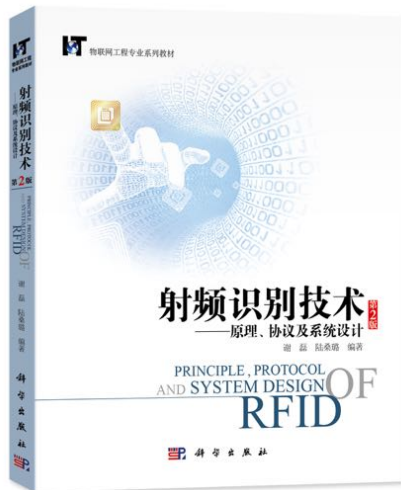
**RFID无源感知**

3

小结

# 专题参考书

## 射频识别技术：原理、协议与系统设计（第三版） 谢磊、陆桑璐 编著



用作本科生/研究生课程教科书：

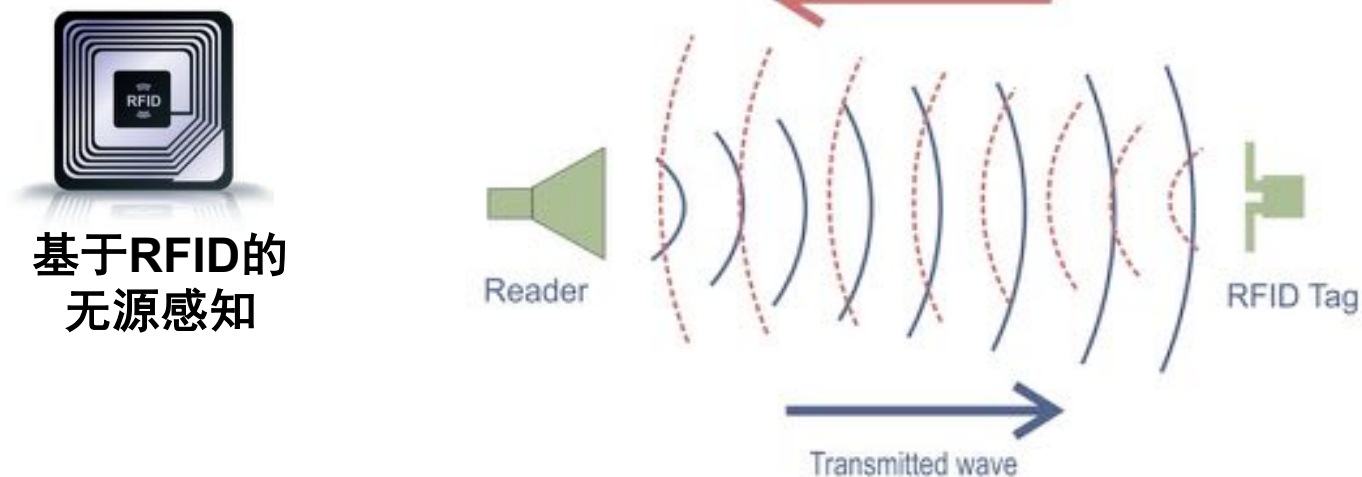
- 本书自2014年出版发行以来，先后出版三版，已售2.6万多册。
- 包括清华大学、北京大学、浙江大学、中国科学技术大学、西安交通大学等120多所高校作为教材。
- 2020年入选南京大学研究生优秀教材，并通过江苏省教育厅推荐申报“全国教材建设优秀教材奖”。
- “物联网技术导论”课程入选南京大学研究生品牌慕课。

### 教材建设成效

- **新形态教材建设**：基于“微课”在线开放课程，进行线上自主学习
- **纸质教材+互联网载体**：二维码扫描即可获取课程内容的多媒体教学资源
- **自主研发软件工具集**：RF-Tools已在GitHub开源，被多个国际研究团队使用
- **追踪最新研究进展**：对最前沿的研究方向进展进行跟踪、总结和思考
- **构建课程实验网站**：提供实验内容、方案、代码、案例等多种素材

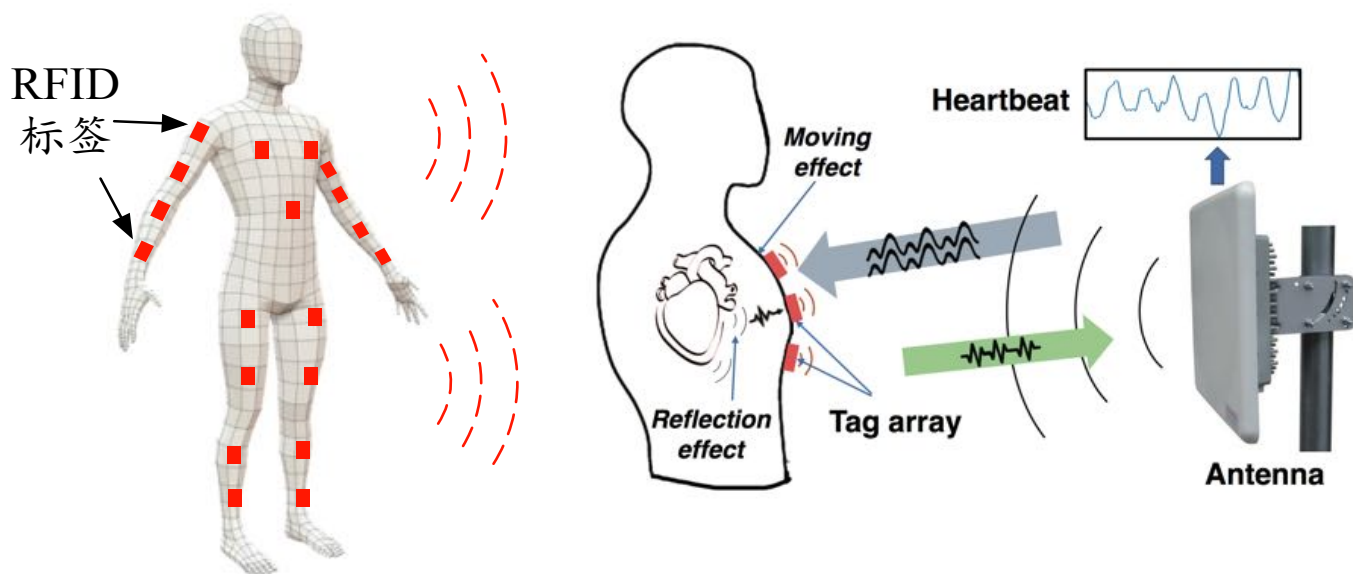
# 基于RFID的无源感知技术研究

## 探索无源感知机理



**挑战：**成本低廉的RFID并非传统意义上的传感器，如何实现“非传感器感知”和“无源感知”？

# 基于RFID的可标记无源感知



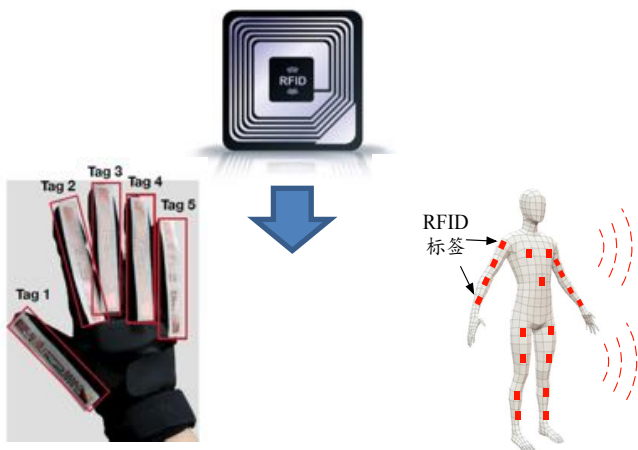
**机遇：** RFID能够被标识的特性可以用来有效地区分感知信号的来源，确保无源感知机制的“可标记性”。

# 基于RFID的无源感知技术研究

**创新思路：**基于“反向散射通信对传输环境敏感”的特性，将通信信号特征转化为感知信号特征，实现由“识别”向“感知”的蜕变。

## 技术创新1

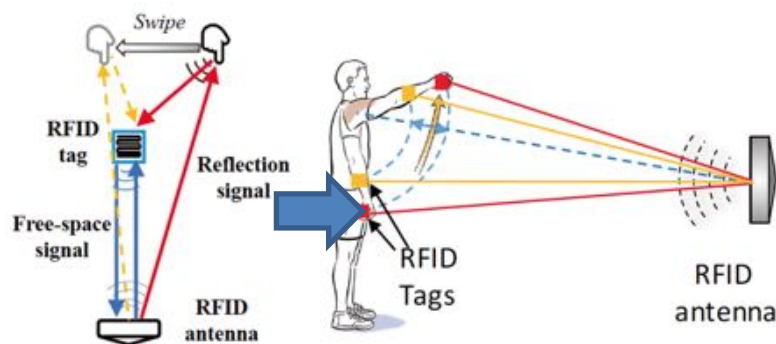
从“单标签感知”到  
“标签阵列感知”



拓展感知维度

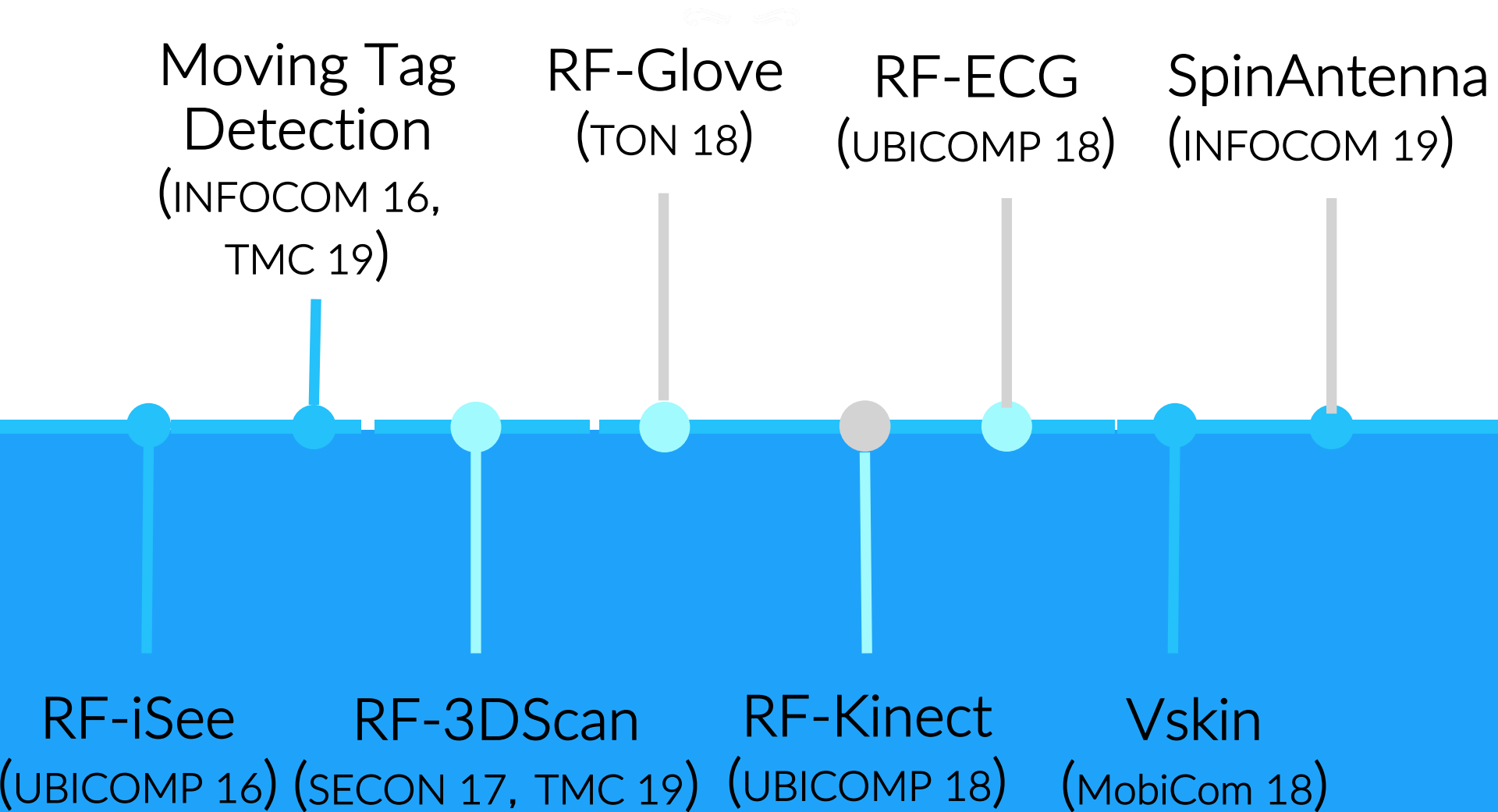
## 技术创新2

从“绝对定位”到  
“相对定位”



提升感知敏感度

# RFID无源感知心路历程



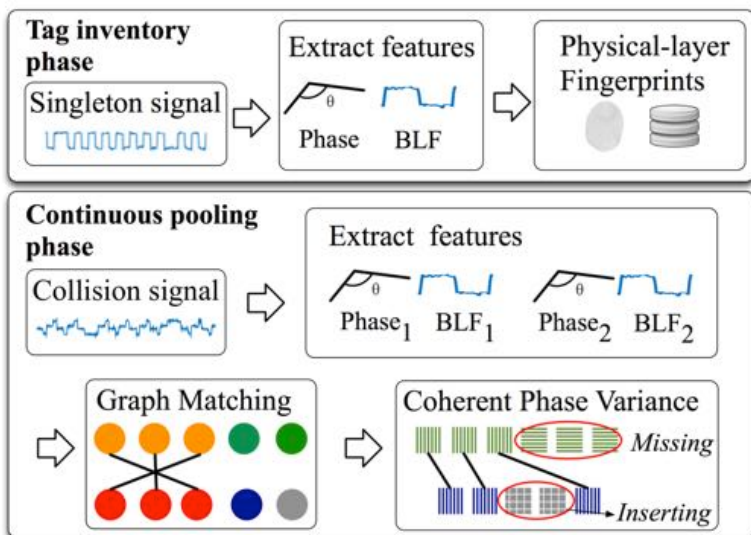
# 问题1:

如何在RFID的“识别”功能中  
嵌入“感知”？

# 代表性成果1-基于物理层特征的移动标签检测



移动标签



**难点：**如何快速从大规模标签中快速找到其中的移动标签，进行移动标签检测？

**创新思想：**直接利用物理层信号检测标签移动，创新性地基于冲突信号抽取物理层信号特征，提升时效性。

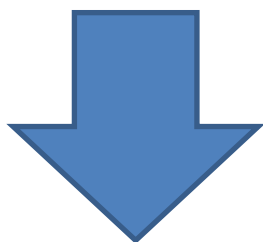
**成果：**IEEE Transactions on Mobile Computing, INFOCOM 2016

# 研究动机和问题

同时定位所有标签



太慢



- 大量静止标签无需定位
- 少量移动标签需要定位

➤ 快速移动标签检测机制

检测移动标签



定位移动标签

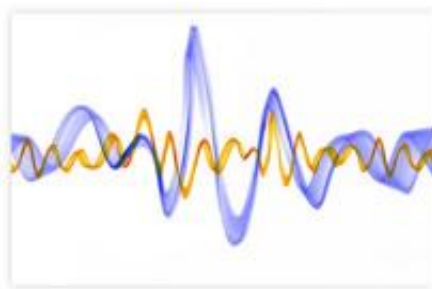


# 研究挑战

## 快速移动标签检测机制

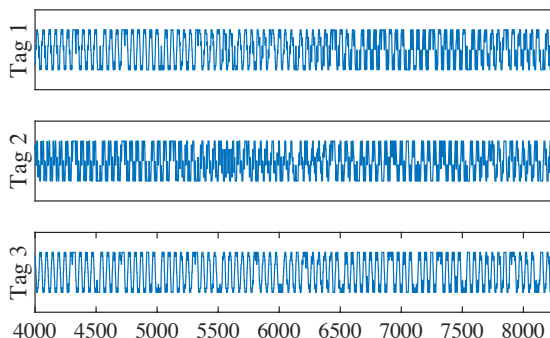
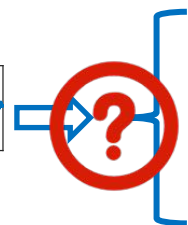
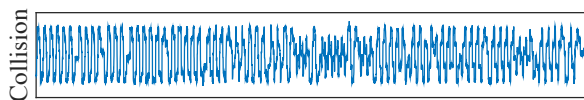
### 1. 如何检测运动状态.

- 研究标签原始信号和运动状态之间的映射关系

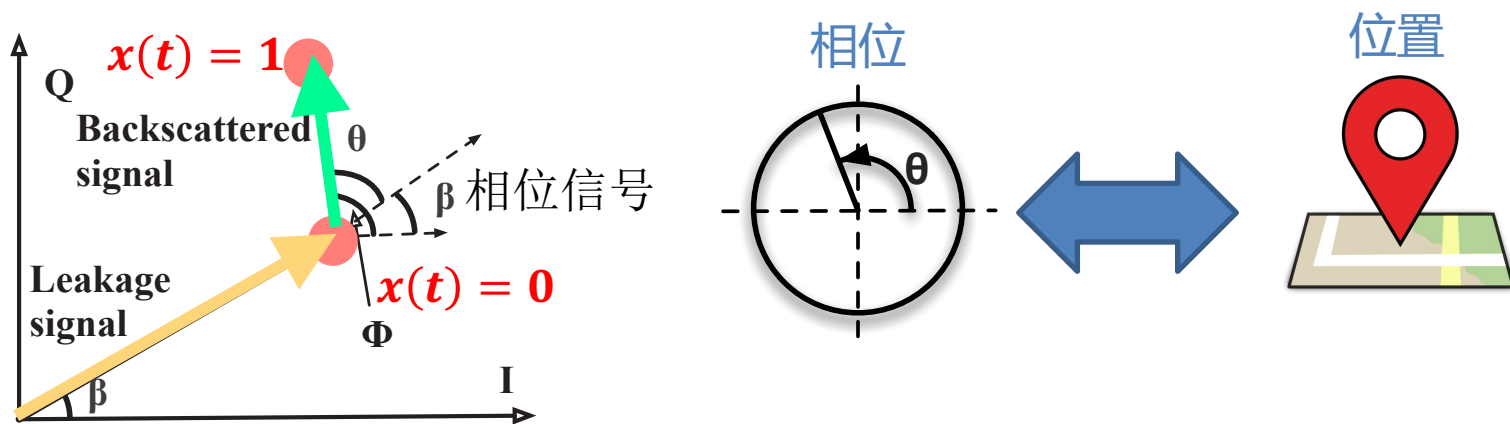


### 2. 如何针对大规模RFID标签实现快速检测

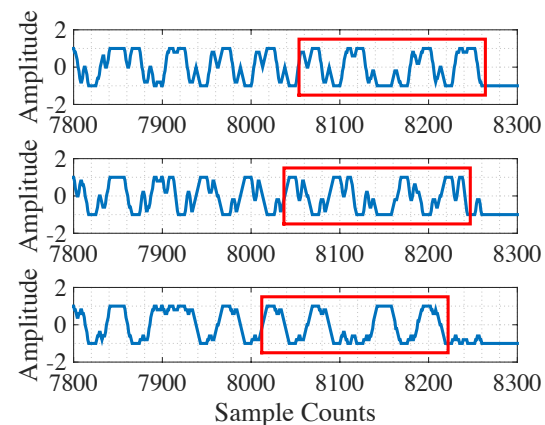
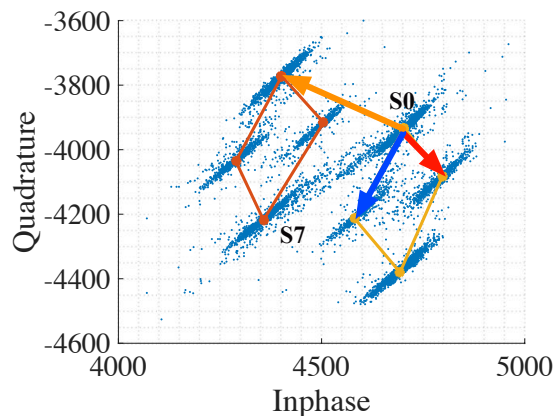
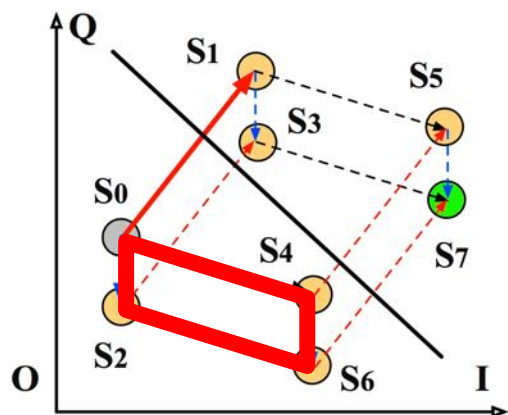
- 从冲突信号中抽取物理层信号特征



# 研究方法和结果

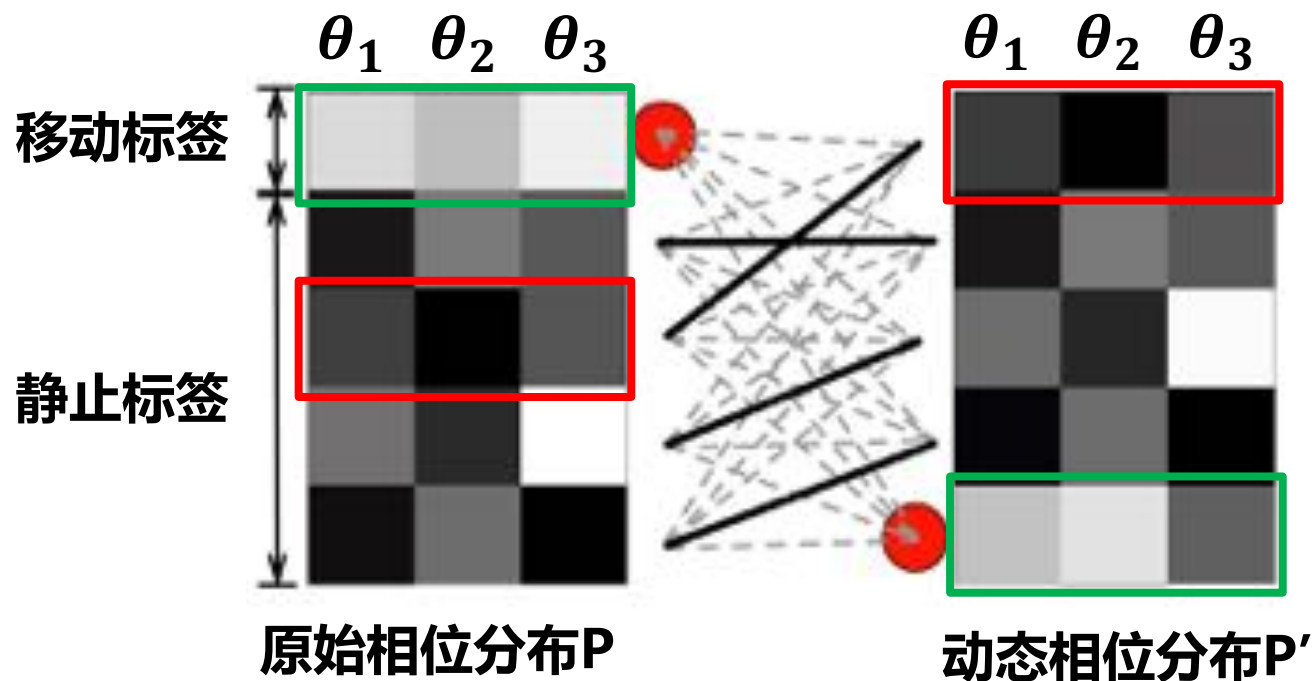


➤ 构建信号IQ模型，从原始信号中抽取相位信息，对应标签位置



➤ 利用信号叠加原理，从IQ信号域使用矢量叠加分解信号，提取单标签信号

## 匈牙利算法检测移动标签

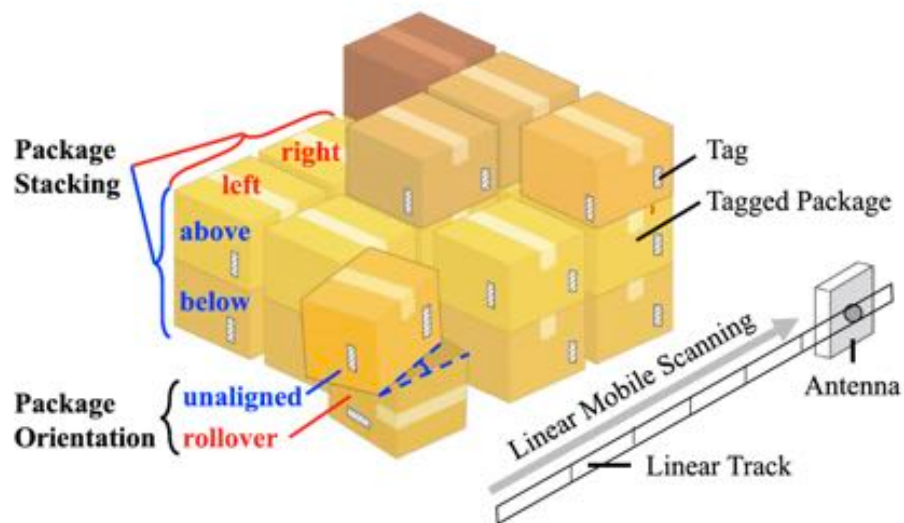


- ◆ 利用匈牙利算法匹配**静止标签**的相位信息。
- ◆ 未匹配成功的就是**移动标签**。

## 问题2:

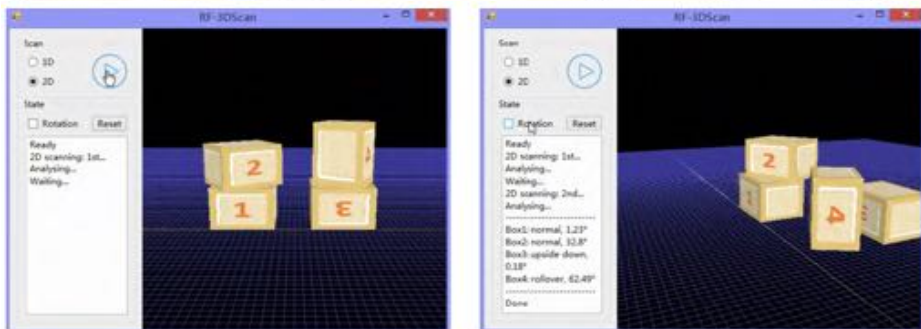
能否基于RFID的可标记感知能力  
实现多目标物体的3D重建?

# 代表性成果2-基于RFID的物品堆放重建技术



**难点：**如何从包含丰富噪声的移动扫描信号中还原贴有标签阵列的物体堆放情况？

**创新思想：**提出基于二维扫描的空间分割方案和基于一次线性扫描的阵列定位方案。



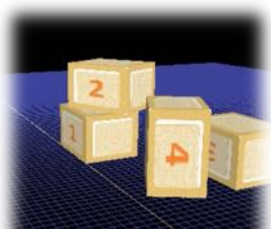
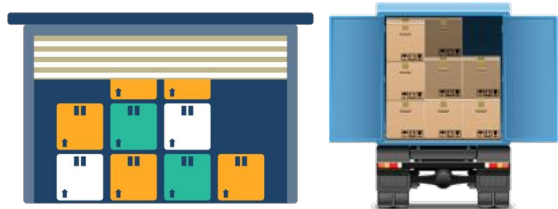
(a) Result with 1st scanning

(b) Result with 2nd scanning

**成果：**SECON, IEEE Transactions on Mobile Computing

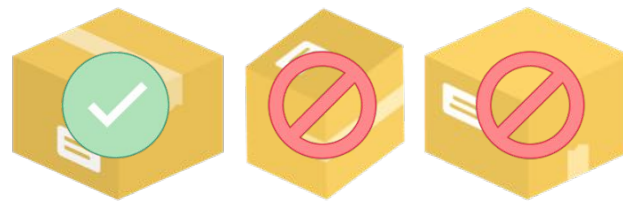
# 研究动机和问题

在传统物流行业中，为保障仓储安全和空间的有效利用，需要对货物的堆放进行重建以实时监控。

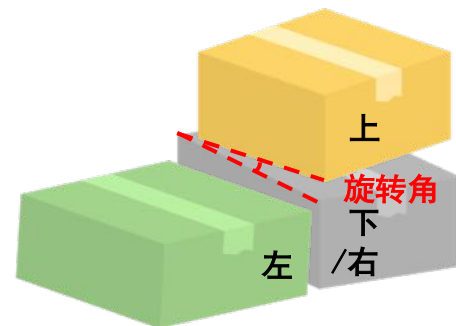


堆放重建

- 单物品：物品方向



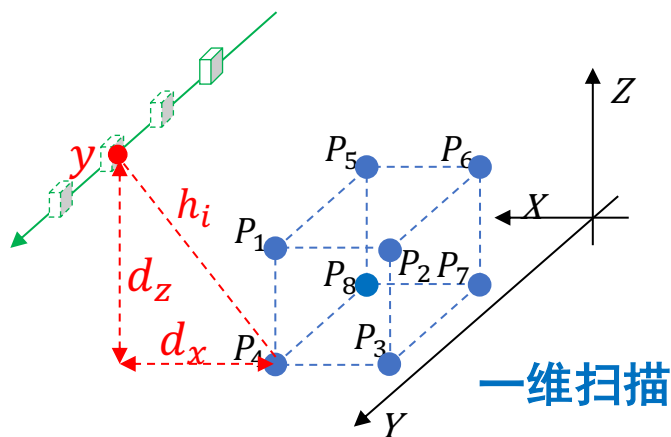
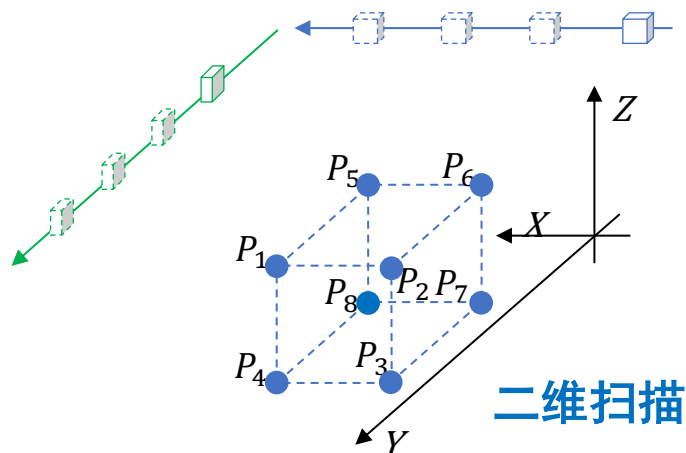
- 多物品：相对堆叠



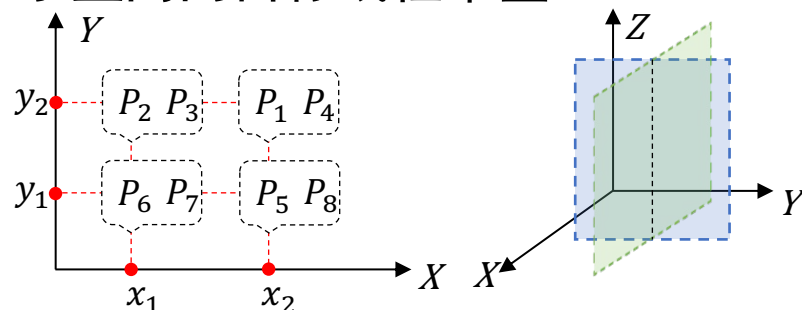
如何基于RFID标签阵列，还原物品的堆放状态？

# 研究挑战和方法

- 挑战1：如何判断标签在三维空间中的相对位置关系？



**方法1：**沿着**二维**扫描方向**分割**空间，子空间内目标线性堆叠



**方法2：**基于**标签阵列**，仅利用**一维**扫描，**定位**物品空间坐标

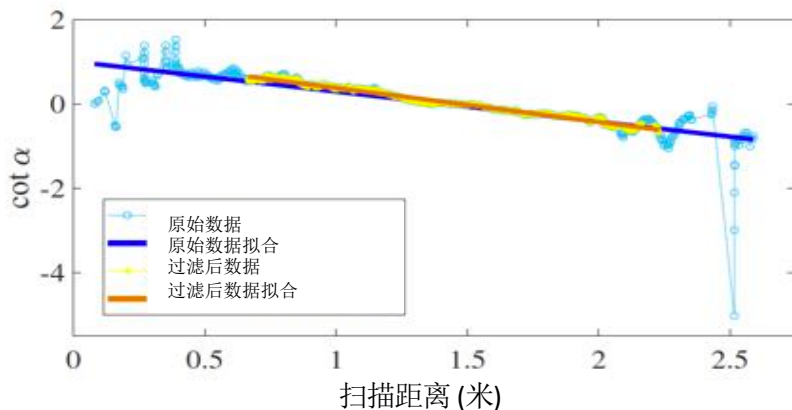
$$\arg \min_{d_x, d_z} \sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2 \longrightarrow \text{三维坐标 } (d_x, y, d_z)$$

**补偿性方案：更易部署、开销更少**

# 研究挑战和方法

- 挑战2：如何从包含丰富噪声的数据中筛选有效数据？

解决方法：自适应异常点过滤，  
每轮迭代自动设置异常点阈值，  
仅保留主要连续数据



真实值：(1.3m, 1.46m)

原始数据拟合：(1.4m, 1.42m)

过滤后数据拟合：(1.23m, 1.47m)

## Algorithm 1 Linear Fitting to Extract Position Indicators.

### Input:

The angle profile of a certain tag,  $\{(\cot \alpha_i, t_i)\}$ ;

The threshold of angle difference,  $\delta_m$ ;

The threshold of time interval,  $t_m$ ;

The threshold of sample length,  $L_m$ ;

### Output:

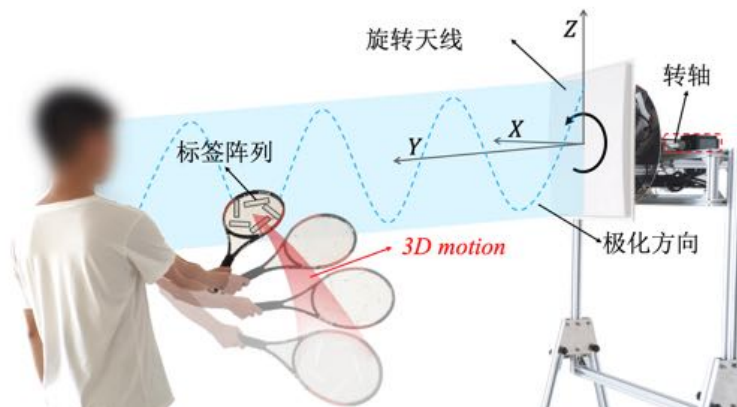
Position indicators,  $h$  and  $l_0$ ;

- 1: Do the linear fitting with the angle profile  $\{(\cot \alpha_i, t_i)\}$  based on Eq. (3), and get the fitted angle profile  $\{(\widehat{\cot \alpha}_i, t_i)\}$ . For each sample  $i$ , compute the absolute angle differences  $\delta_i = \|\cot \alpha_i - \widehat{\cot \alpha}_i\|$ ;
- 2: **while** the maximum value of  $\{\delta_i\} > \delta_m$  **do**
- 3: Calculate the error  $\delta_t$  according to the formula:  $\delta_t = \max(\delta_m, t_i)$  **自动设置异常点阈值**
- 4: Remove all outliers with  $\delta_i > \delta_t$  in the angle profile;
- 5: Check the continuity of the angle profile, if the time interval between two adjacent samples is greater than  $t_m$ , split samples and keep the major continuous part. **消除数据不连续性**
- 6: Redo the linear fitting with the remaining samples, and compute the new angle differences  $\{\delta_i\}$ ;
- 7: **end while**
- 8: **if** the length of remaining samples  $> L_m$  **then**
- 9: Calculate position indicators  $h$  and  $l_0$  according to the final linear fitting result based on Eq. (3);
- 10: **return**  $h$  and  $l_0$ ;
- 11: **else**
- 12: Abandon this angle profile;
- 13: **return** ;
- 14: **end if**

## 问题3:

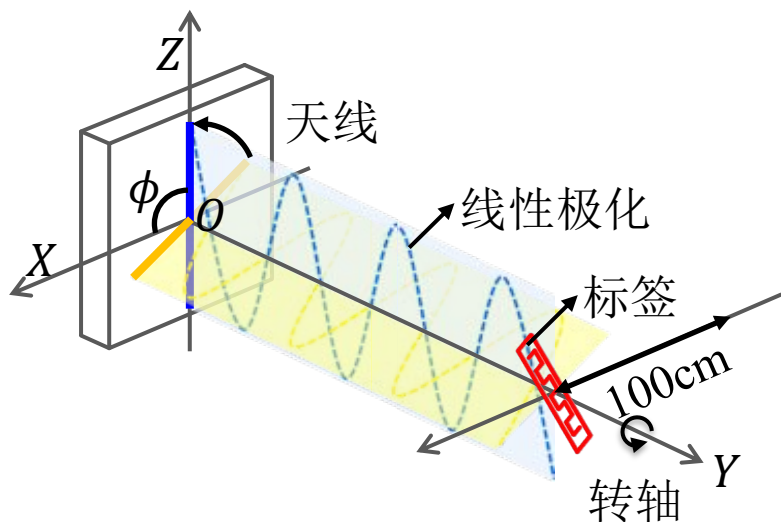
能否基于RFID的可标记感知能力  
实现精确的3D空间姿态感知?

# 代表性成果3-基于旋转天线的运动姿态感知技术



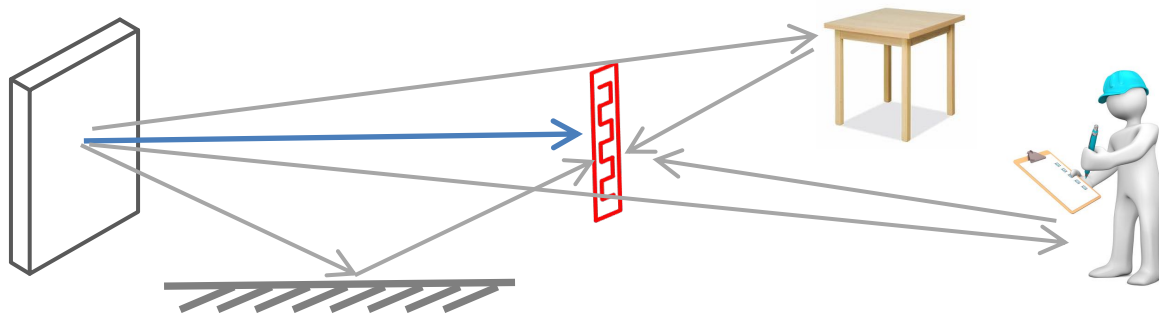
**难点：**如何使用轻量级的RFID标签，对运动目标（如球拍）的**运动姿态**进行连续感知？

**创新思想：**使用**旋转的线性极化天线**，对运动目标的旋转角度进行感知，使用标签阵列对标签的空间位置进行感知。



**成果：** INFOCOM 2019

# 研究动机和问题



静止天线的信号容易受环境影响，姿态感知误差大！



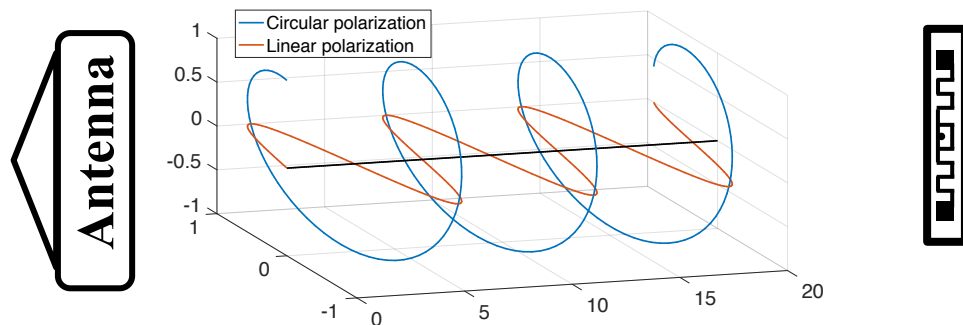
旋转天线

使用**旋转的线性极化天线**动态读取标签

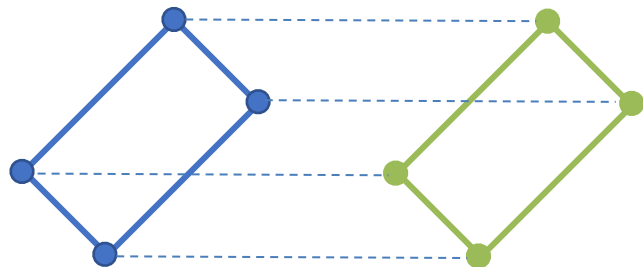
- 规避静态环境干扰
- 提高极化方向多样性

# 研究挑战

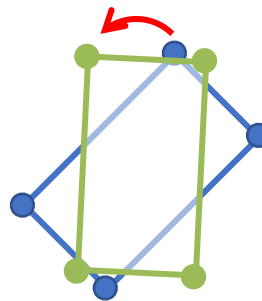
- 天线旋转过程中，信号的变化原理是什么？



- 如何利用信号变化估算物体在3D空间中的**平移**和**旋转**？

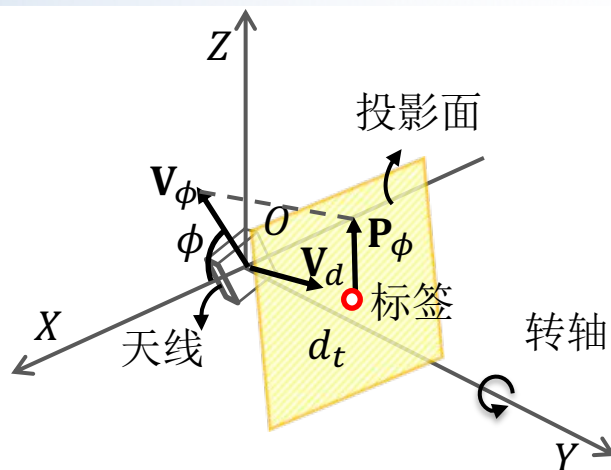
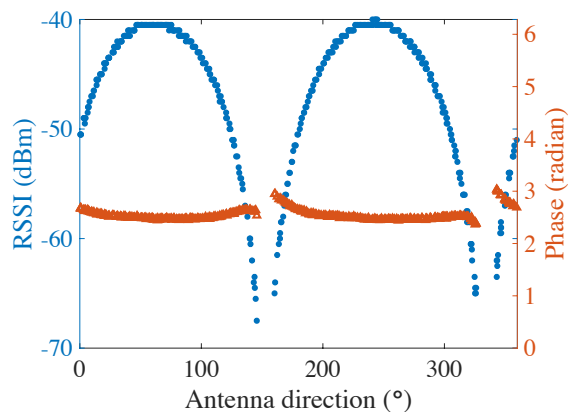


平移

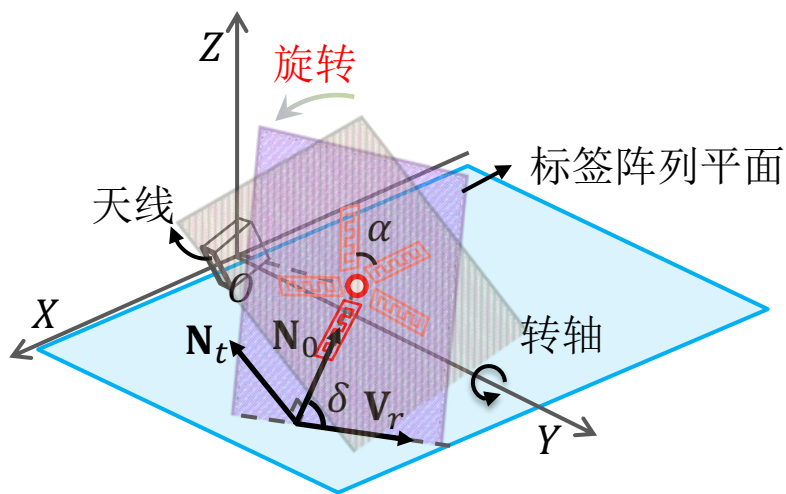


旋转

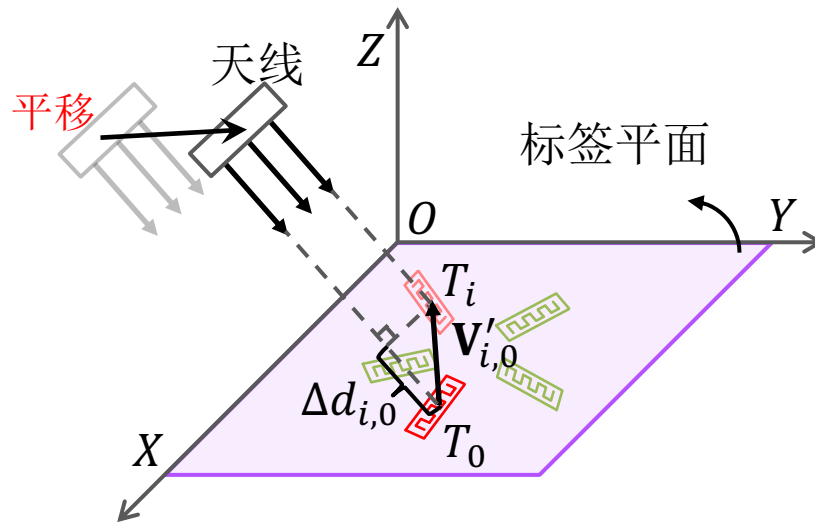
# 研究方法和结果



➤ 天线旋转过程中，信号周期变化，建立天线耦合模型表示其变化。

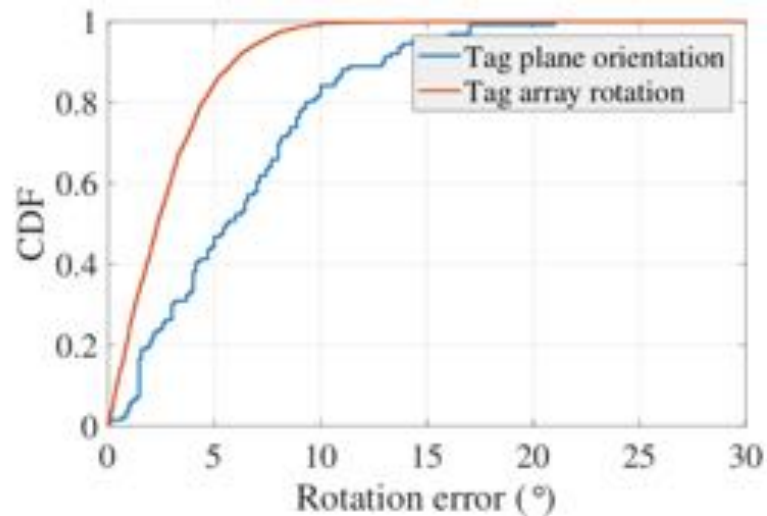
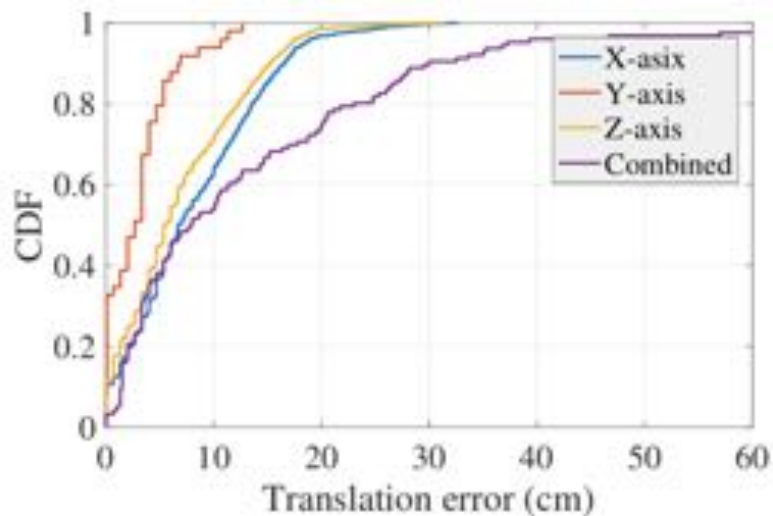
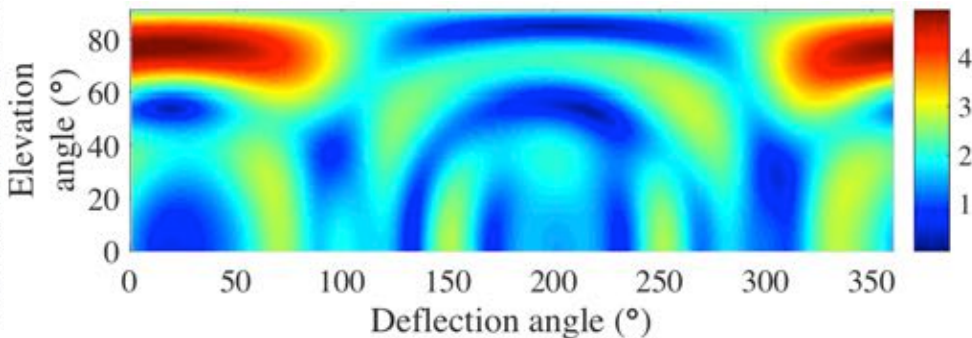
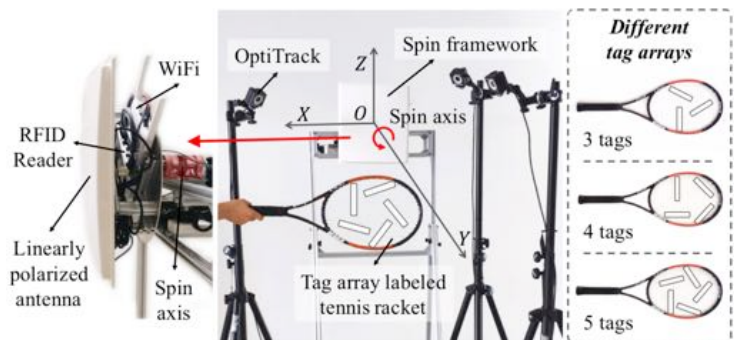


➤ 利用耦合模型判断旋转角度



➤ 利用阵列相位判断运动位移

# Spin-antenna

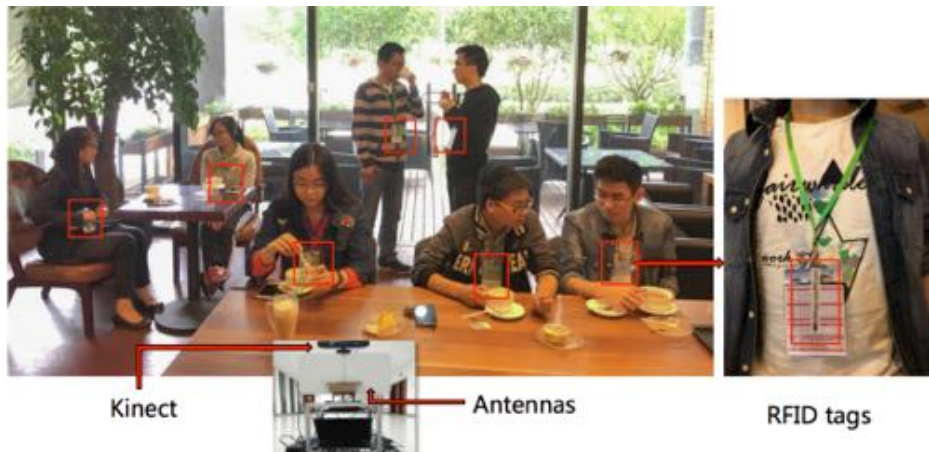


**平均移动追踪误差: 13.6cm**  
**平均角度估算误差: 8.3°**

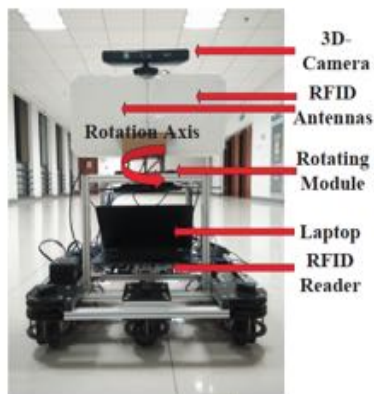
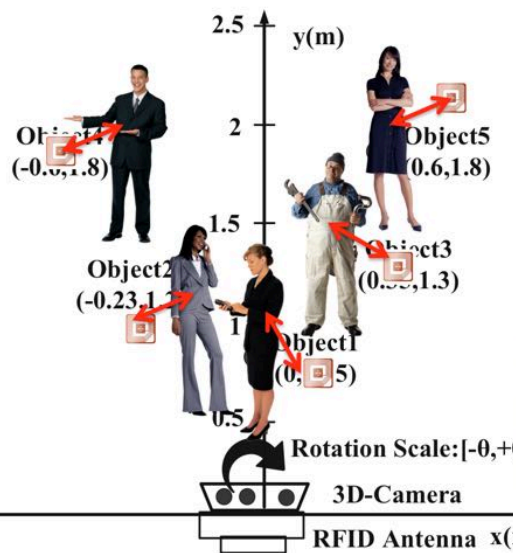
## 问题4:

如何在RFID的无源感知与其他模态的感知进行融合，实现增强感知？

# 代表性成果4- RFID感知与视觉感知的融合



**难点：**如何在非理想、多种干扰环境下实现可靠的目标位置感知？



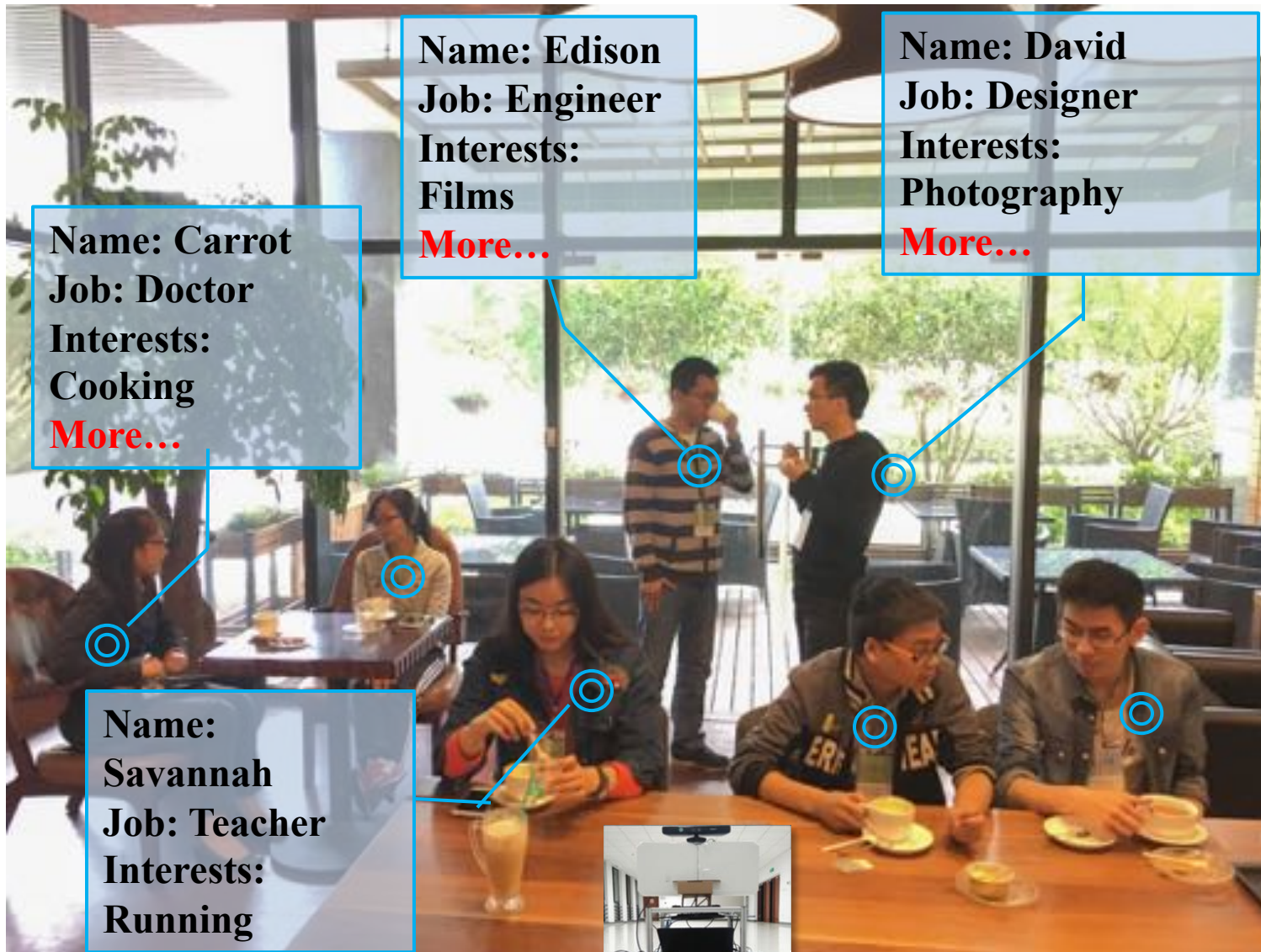
**创新思想：**提出基于“相对定位”的解决方案，来有效区分不同位置的被标记目标。

**成果：** ACM UBICOMP 2016

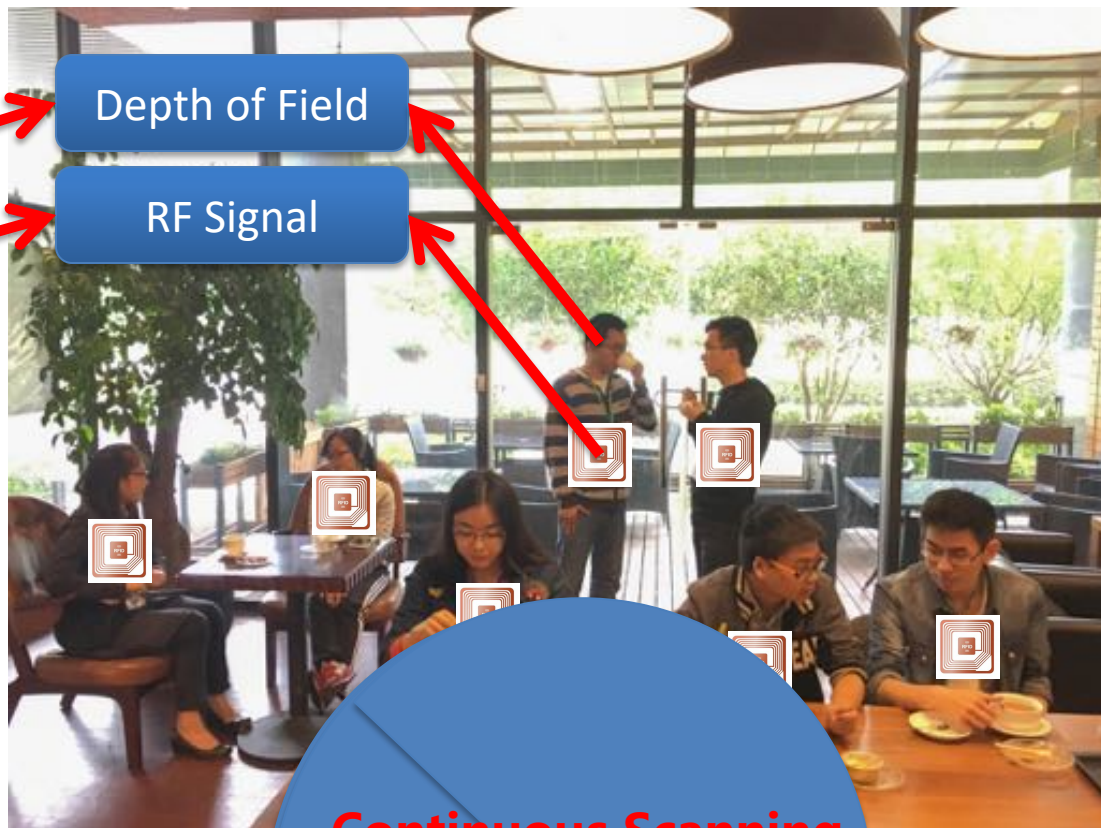
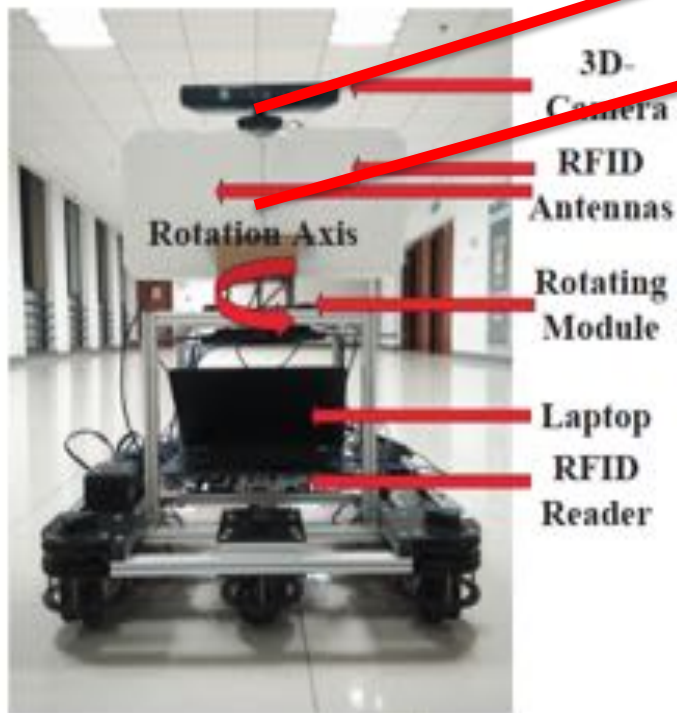
# 现实增强智能



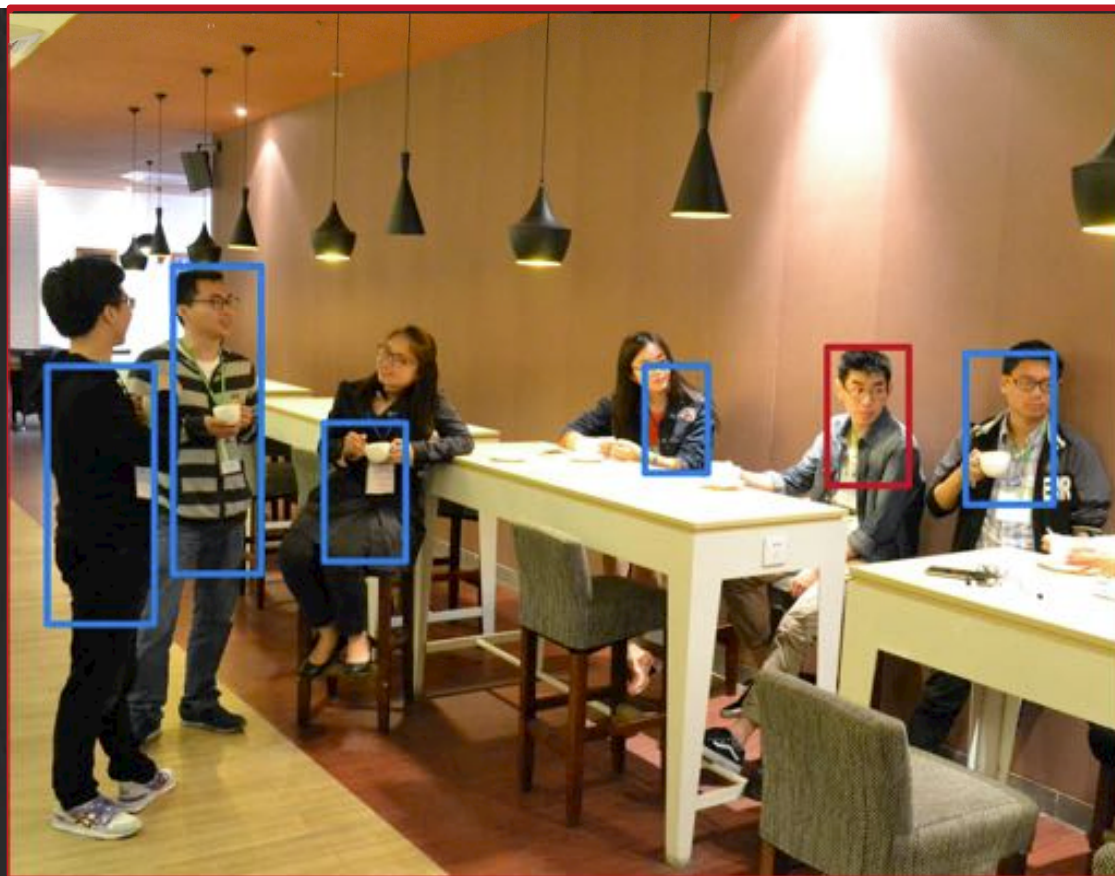
# 现实增强智能



# 现实增强智能



# 现实增强智能



**Object's Image**

Name: Liang  
Job: Engineer  
Age: 25  
Interest:  
Football, Music

**Detailed Description**

- Static Scanning
- Continuous Scanning

**Match Algorithm**

SCAN

**Scan Button**

Object: 706mm depth  
Object: 1122mm depth  
Object: 1477mm depth

Dist: RSSI-72.5

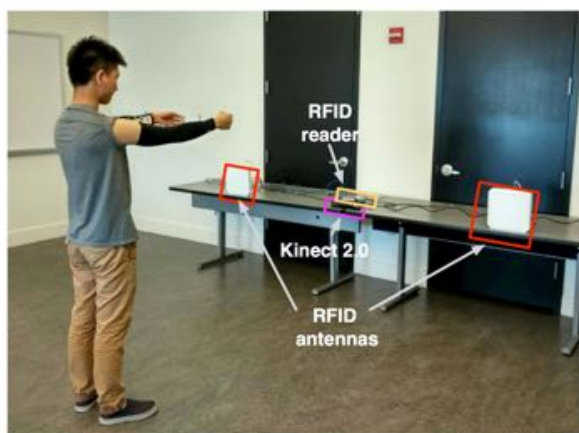
Dist: RSSI-72.5, Depth:GRS Kine  
Pillow:

**Experiment Results**

## 问题5:

能否基于RFID的可标记感知能力  
对人体实现厘米级的3D骨骼追踪?

# 研究成果-基于可穿戴标签阵列的肢体行为追踪机制



**难点：**如何仅利用双天线实现三维空间中的肢体追踪识别？

**创新思想：**提出基于标签相位关联的感知模型，利用标签阵列间的位置相关性实现了3D空间中肢体角度的追踪，消除了用户依赖性。

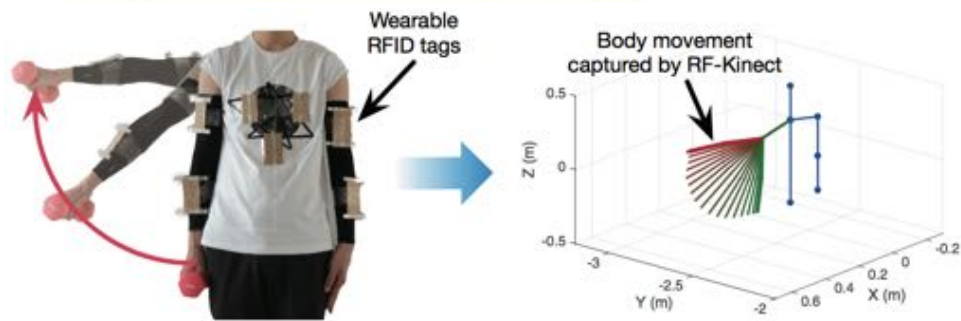
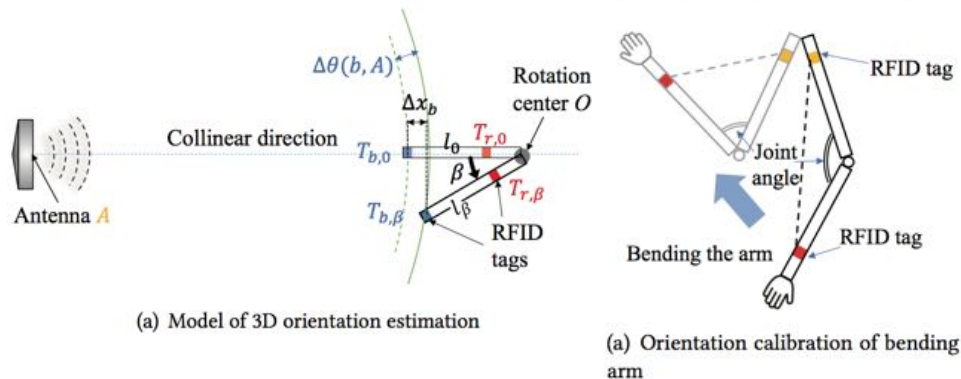
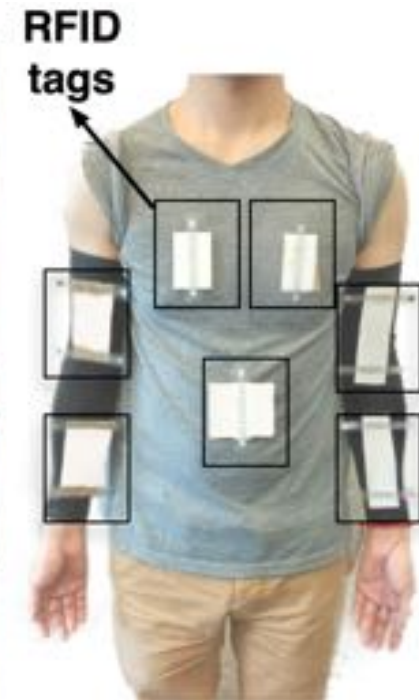
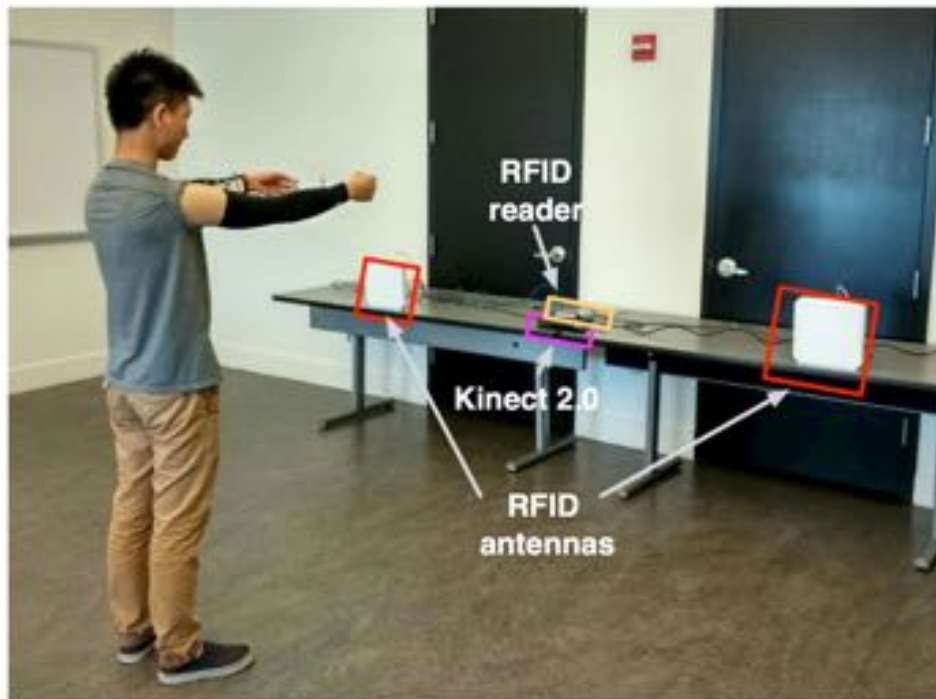


Fig. 1. RF-Kinect: tracking the body movement based on wearable RFID tags.

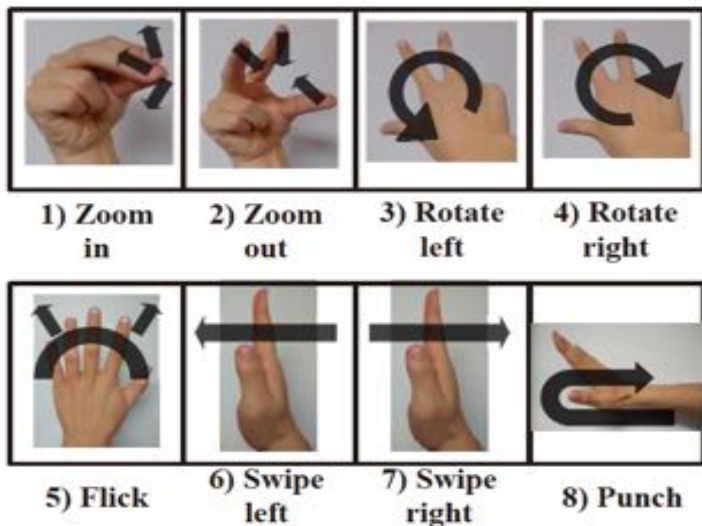


**成果：**ACM UBICOMP 2018

# RF-Kinect : 基于RFID标签阵列的肢体运动追踪系统



# 代表性成果-基于RFID的高精度隔空交互技术



**难点：**多目标同时移动时，如何对更为微小的动作(如手指移动)进行有效的区分和精确的感知？

**创新思想：**构建微动作感知三维空间模型，提出“基于相对定位”的微动作感知方案，识别细微变化的单一手指动作和组合手指动作。

**成果：**ACM / IEEE Transactions on Networking, INFOCOM 2018

## 代表性成果-基于RFID的高精度隔空交互技术



# CCTV-2采访



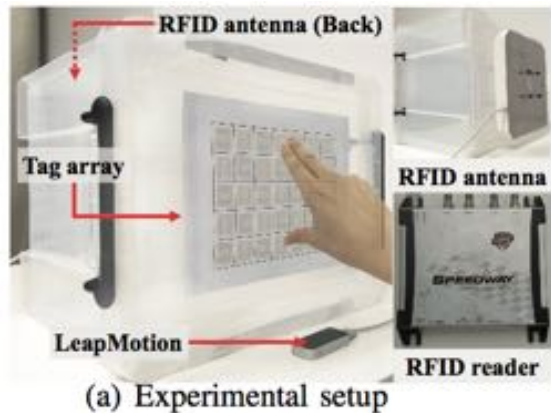
央视CCTV2频道在午间新闻时段对该“无源感知”创新成果重点报导

## 问题6:

能否基于RFID标签阵列

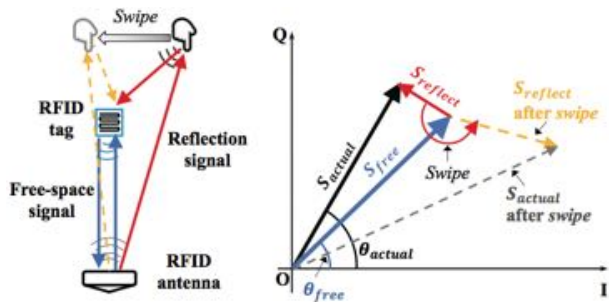
实现非绑定式的手势识别与追踪?

# 基于标签阵列的非穿戴式细粒度手势感知



**难点：**如何捕捉细粒度的手指移动，以及处理手指之间的信号干扰？

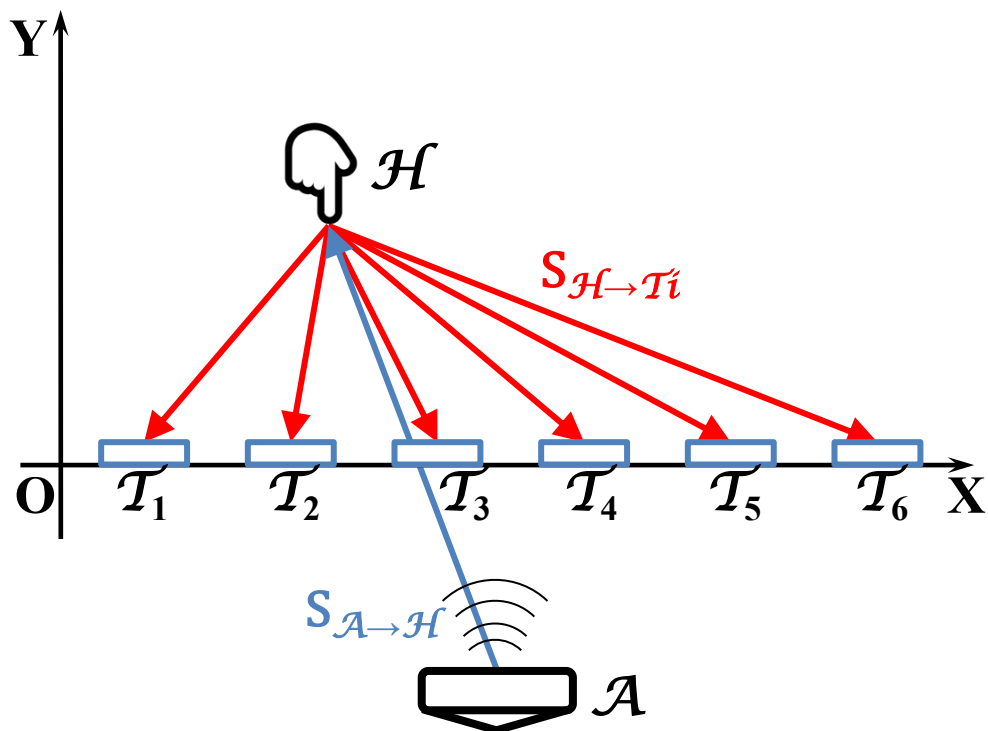
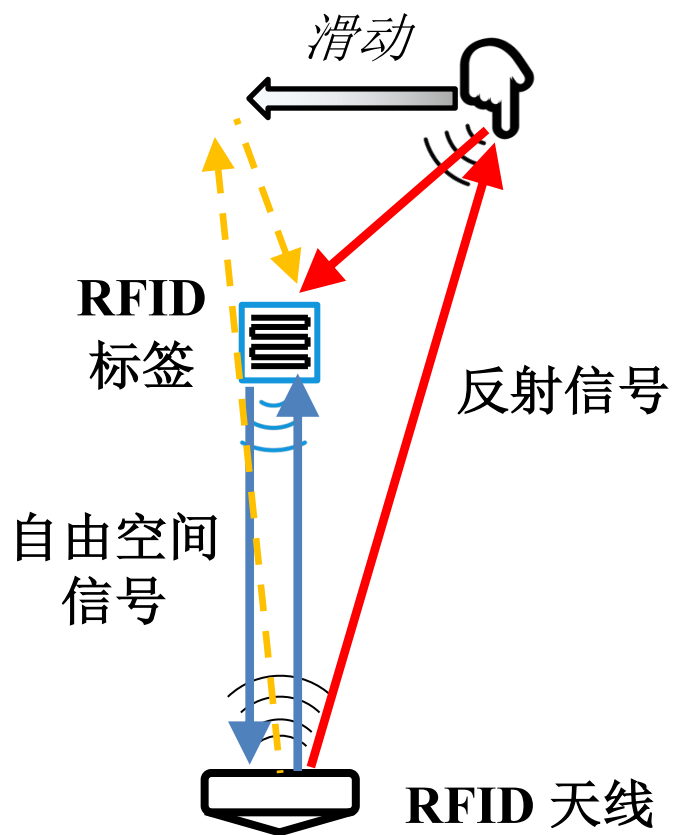
**创新思想：**建立了信号的反射模型，提出了“相位阵列”的联合感知，基于模型抽取细粒度的信号特征，实现了手指追踪与多指识别等功能。



**成果：**INFOCOM 2018

# 抽取细粒度反射信号特征

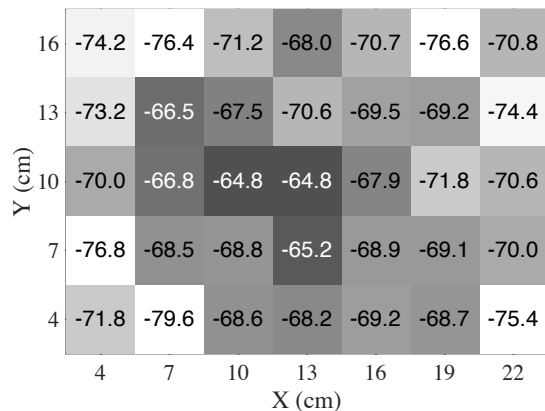
- 单标签反射信号模型 标签信号差 $\rightarrow$ 反射信号 $\rightarrow$ 多标签反射信号



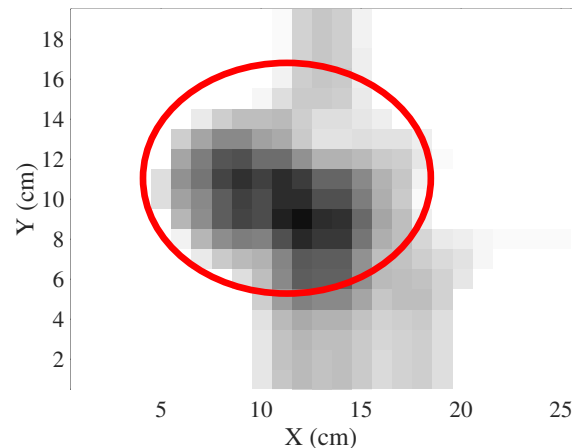
从实际信号中去除自由空间信号得到反射信号

拓展单标签信号模型

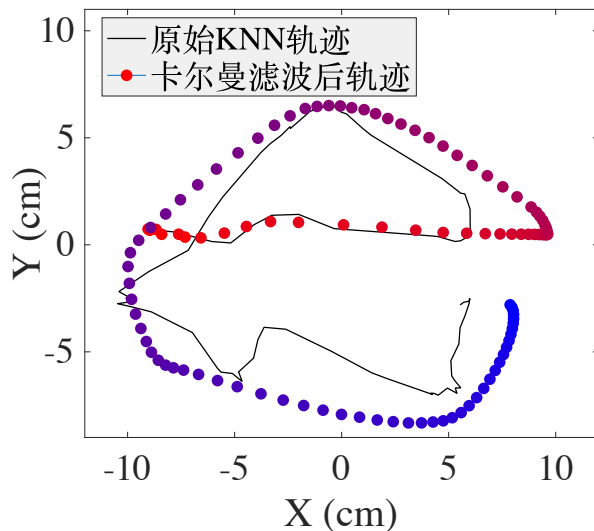
# 手势轨迹追踪感知



利用反射信号分布模型，  
对标签反射信号进行细化



对每个窗口使用KNN定位



将连续时间内的手指位置串联，  
利用卡尔曼滤波平滑轨迹

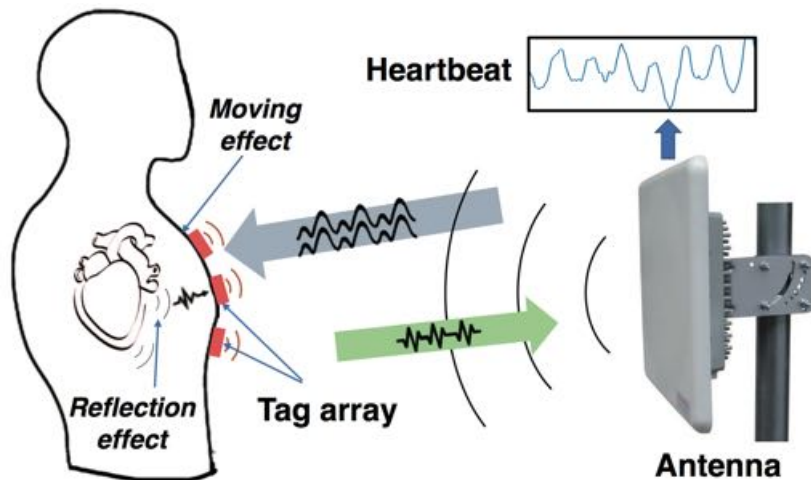
# 系统实现



## 问题7:

能否基于RFID的可标记感知能力  
对人体实现毫米级的生命体征感知?

# 代表性成果-基于RFID的心跳监测技术



(b) Illustration of working flow of RF-ECG



Fig. 15. Experiment setup.

**难点：**如何从包含高强度呼吸信号的复合信号中，提取微弱的细粒度心率信息？

**创新思想：**提出基于标签阵列的反射感知模型，利用模型过滤呼吸产生的标签运行，并使用标签的反射信号融合抽取细粒度心率信息。

**成果：**ACM UBICOMP 2018

## 问题8:

RFID的感知极限在哪里？

以液体感知为例，能否实现毫米级感知？

# 基于RFID的智能输液监测：应用痛点

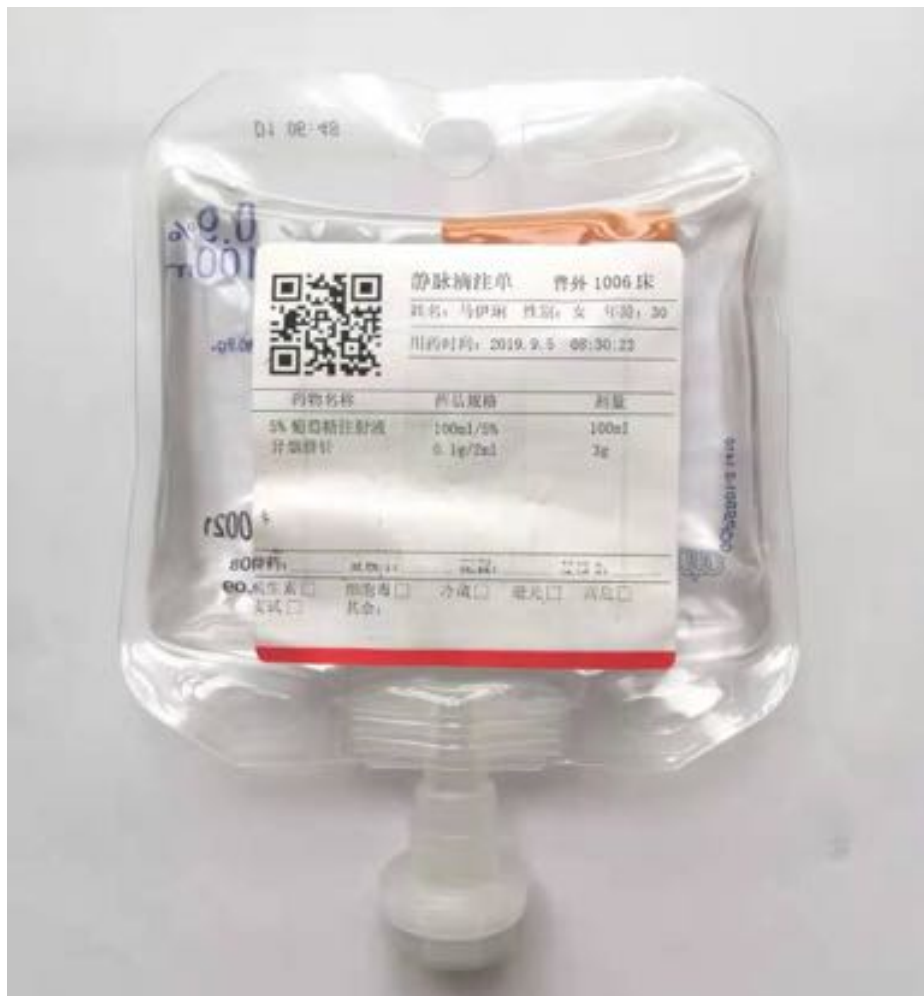


**护理开销大：**依赖医护人员的重复性巡查来实施输液监测，工作繁复琐碎，却仍然不能及时处理

**智能化程度低：**现有解决方案精度低、响应慢、维护成本高，缺乏一体化、智能化的解决方案

**易导致医患矛盾：**输液监测若处理不及时，会造成很多副作用，导致医患矛盾

# 创新解决方案1-输液液位监测



一张带有RFID芯片的输液  
贴纸，改变输液监测模式

# 基于RFID的无源感知解决方案



**不同水位对反向散射信号的多径效应和能量特征有所不同**



# 实际应用系统-1

The screenshot displays a web-based interface for an infusion monitoring system. At the top, a blue header bar contains the system logo and name '尔福康智能输液监测系统' on the left, and the user information '欢迎: user1 [退出]' on the right. A left sidebar menu includes options for '首页', '输液控制', '历史记录', and '系统相关'. The main content area is divided into several sections:

- System Status Bar (系统状态栏):** Located at the top center, it features a nurse icon, a red circled '1' pointing to a welcome message '欢迎使用尔福康智能输液监测系统', and a green status indicator with the text '您的当前区域为A病区'.
- Task Alert Window (任务提醒窗口):** A table below the status bar lists infusion tasks. A red circled '3' points to a task entry: '任务提醒窗口'.
- Pop-up and Alarm (弹窗与铃声报警):** A red circled '4' points to a task entry: '弹窗与铃声报警'.
- Infusion Status Display Window (输液情况显示窗口):** A grid on the right shows six infusion sets. A red circled '2' points to the second set (A002). Each set displays its ID, flow rate (e.g., 27/min or 54/min), and status (e.g., '输液中').

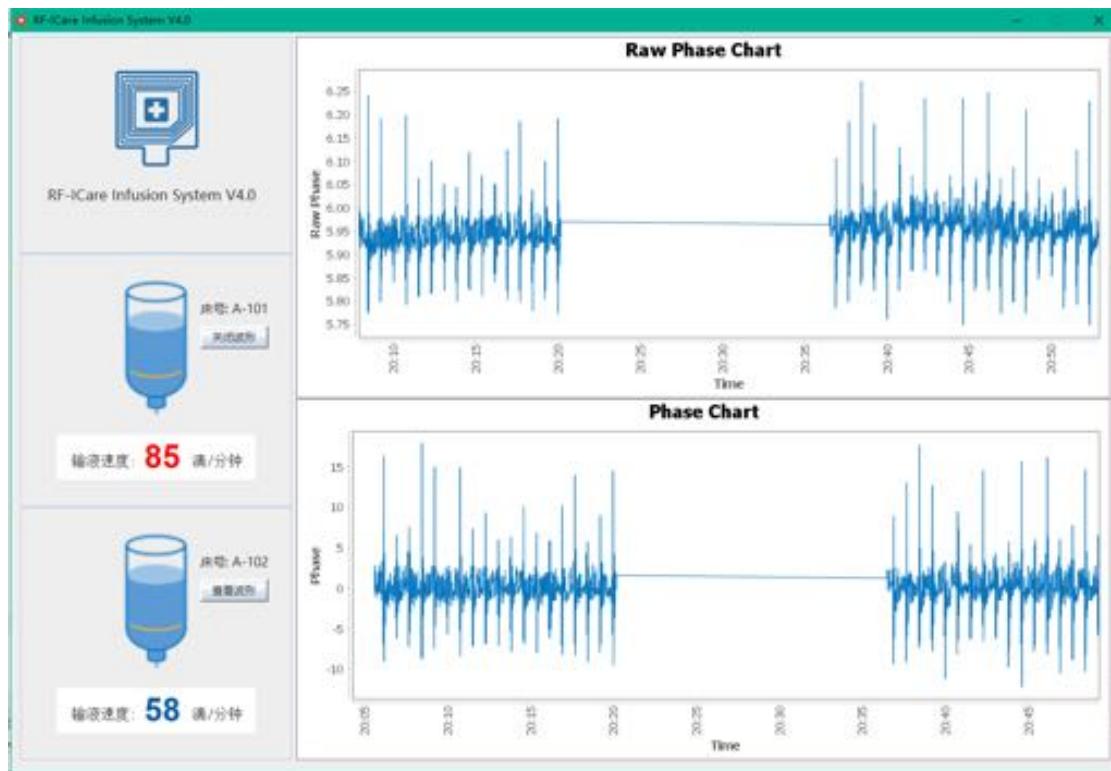
通过浏览器即可实现对患者输液状态（液位/滴速）的大规模并发监测，输液完毕/异常事件发生时会自动通知，完全自动化、智能化。

# 实际应用系统-2

## 手机端APP

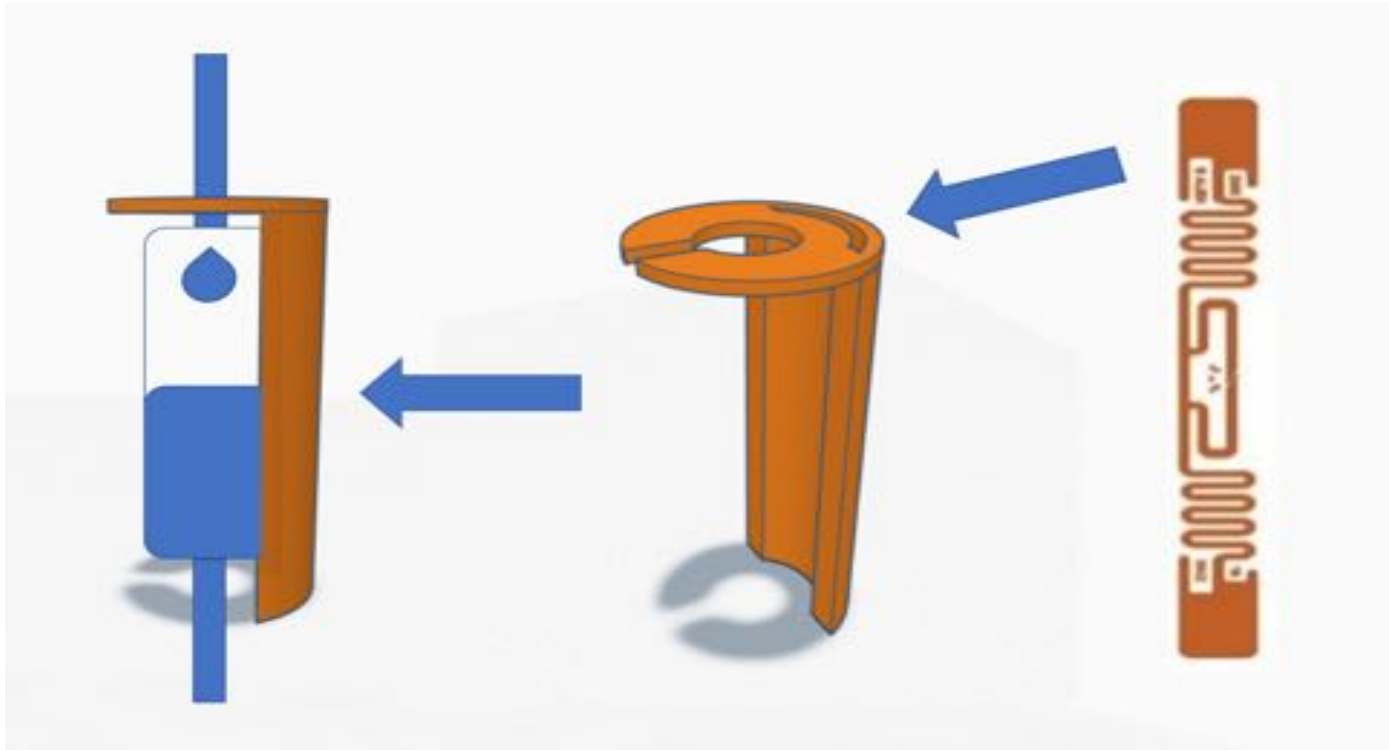


## 实时监测滴速变化



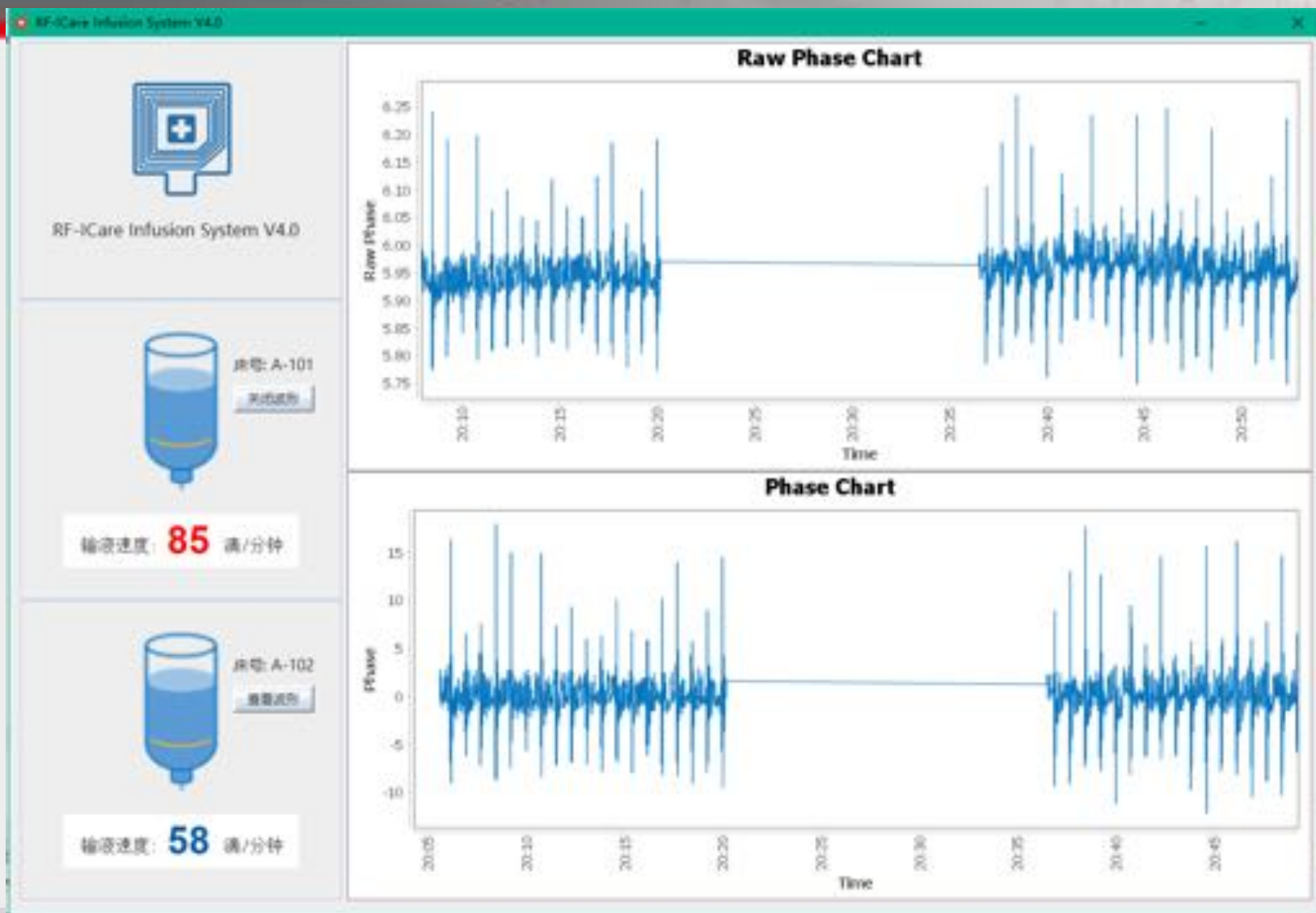
支持移动终端APP和微信平台，更为便捷，用户体验好。

## 创新解决方案2-输液滴速监测

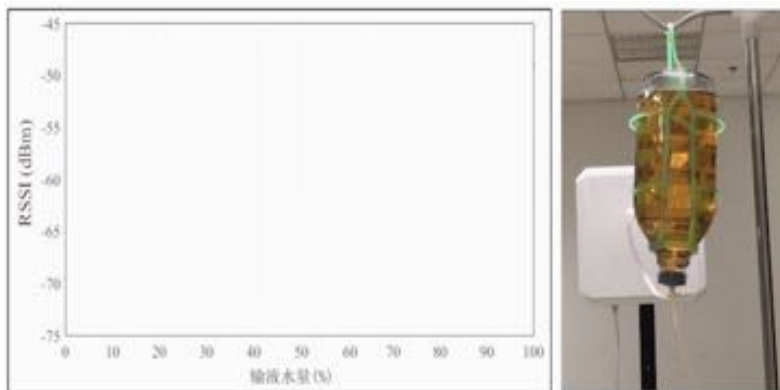


一张带有RFID芯片的夹子，  
无需加载电池，即可实现高  
精度滴速监测

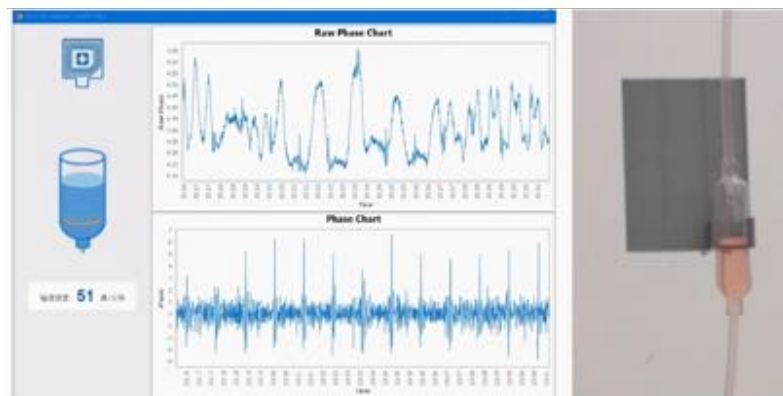
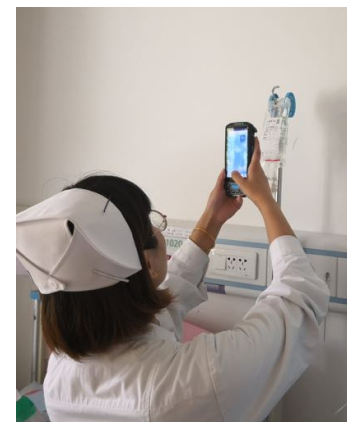
# 输液滴速监测



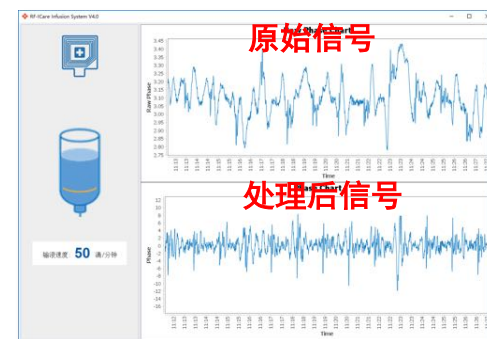
# 毫米级感知-输液液位与滴速感知



液位感知  
毫米级的感知精度  
感知粒度<5mm



滴速感知  
毫米级的感知精度  
感知粒度<2mm



# 研究成果实际应用

以“面向医疗的智能感知”为应用切入点，研究成果在包括广州医科大学附属第二医院、南京市鼓楼医院仙林分院、南京市紫金医院、江苏泰乐城凤栖护理院等国内多家医疗和养老机构进行实际应用。



南京市紫金医院病房应用案例



无锡市第二中医医院挂水大厅应用案例



泰康仙林鼓楼医院  
Taikang Xianlin Drum Tower Hospital  
南京大学医学院附属泰康仙林鼓楼医院  
南京鼓楼医院集团成员



无锡市第二中医医院  
无锡市滨湖区中医院



# 智能感知网关：一体化解决方案



RFID天线、多模态传感器

微型化智能网关  
(内嵌阅读器、处理器、  
多接口网络模块)

边缘计算理念在智能感知领域的全新实现



1

智能感知

2

RFID无源感知

3

小结

# 小结: 拓展感知范畴

实时定位追踪

物体姿态追踪

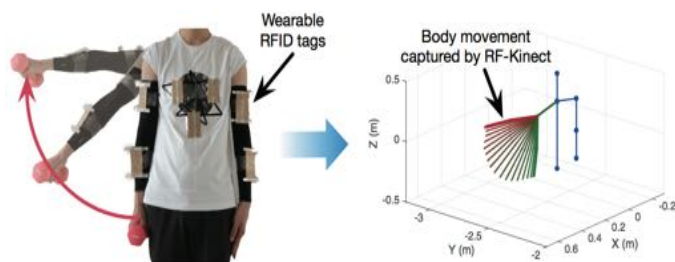
人体微动作感知

心跳 / 呼吸监测



AR环境多目标区分  
(感知精度: 10cm)

TMC'18  
UBICOMP'16



人体肢体追踪  
(感知精度: 5cm, 10°)

UBICOMP'18

Fig. 1. RF-Kinect: tracking the body movement based on wearable RFID tags.

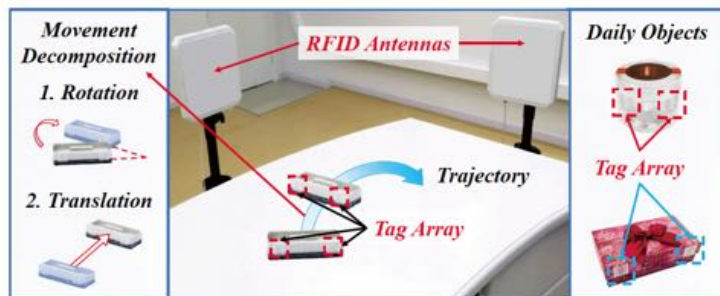
# 小结: 拓展感知范畴

实时定位追踪

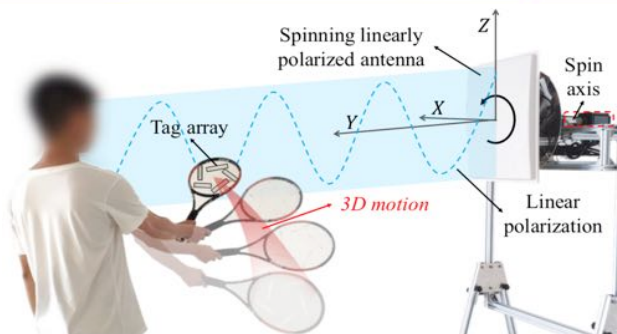
物体姿态追踪

人体微动作感知

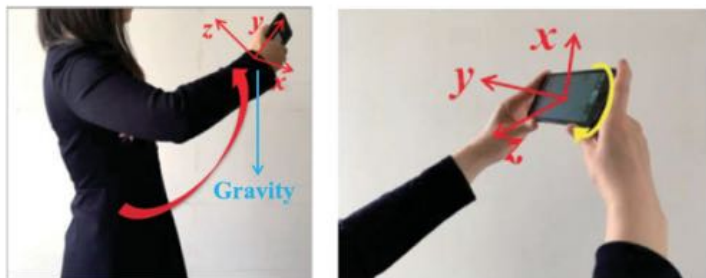
心跳 / 呼吸监测



**2D空间:**  
平移 / 旋转感知  
(感知精度: 2cm, 2°)  
**INFOCOM'18**



**3D空间:**  
平移 / 旋转感知  
(感知精度: 10cm, 10°)  
**INFOCOM'19**



**手机拍照姿态监测**  
(感知精度: 10cm, 5°)  
**TOSN'17**

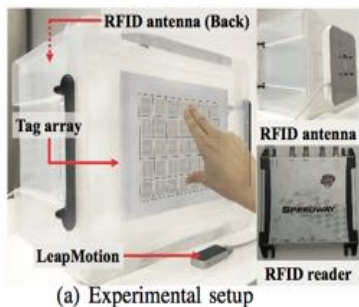
# 小结: 拓展感知范畴

实时定位追踪

物体姿态追踪

人体微动作感知

心跳 / 呼吸监测



非绑定细粒度  
手势感知  
感知精度: 2cm)  
**INFOCOM'18**



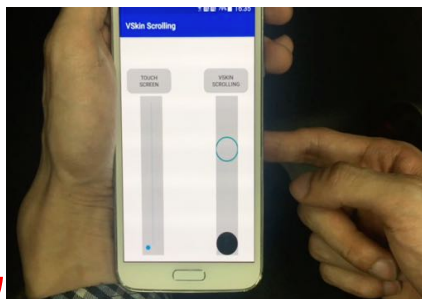
高精度隔空交互  
(感知精度: 2cm)  
**ToN'18**



基于视觉的键盘输入  
(感知精度: 1cm)

**TMC'18**  
**INFOCOM'16**

国际 (美国) 专利授权



基于超声波的  
新型手机触摸感知  
(感知精度: 3-4mm)

**MOBICOM'18**

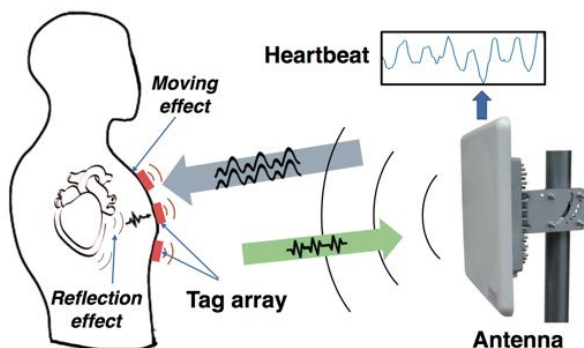
# 小结: 拓展感知范畴

实时定位追踪

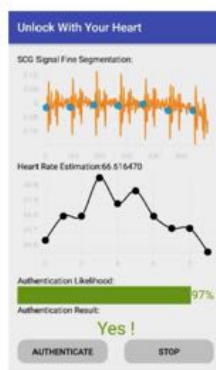
物体姿态追踪

人体微动作感知

心跳 / 呼吸监测



基于RFID的  
高精度心跳监测  
(感知精度: 1-2mm)  
**UBICOMP'18**



基于IMU的  
高精度心跳监测  
(感知精度: 1-2mm)  
**UBICOMP'18**

# 小结：探索感知极限

分米级感知

厘米级感知

毫米级感知

## ➤ 当前国际上定位与感知方案精度

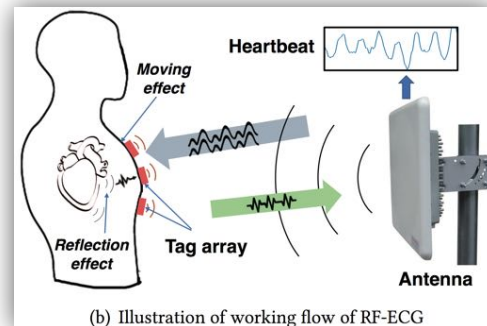
研究单位	会议/期刊	系统名称	感知精度
清华大学	MOBICOM'14	TagOram	7cm
美国MIT	SIGCOMM'14	RFIDraw	5cm
美国MIT	MOBICOM'17	RFind	2cm



微动作感知

## ➤ 我们系统的感知精度

感知领域	系统名称	感知精度
微动作感知	RF-Glove	2-3cm
高精度液位感知	RF-Care	1cm
超声波触摸感知	VSkin	3-4mm
生命体征感知	RF-ECG	1-2mm



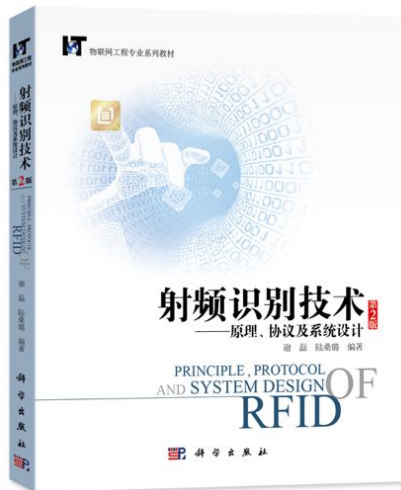
生命体征感知

# 课程作业1（读书报告）

- **可选择如下之一的课题对相关论文进行阅读，并完成读书报告。要求对两篇以上的论文进行阅读，对论文中的算法、协议以及相关内容进行总结、归纳。鼓励提出创新的研究思路和解决方案。**
  - RFID标签识别机制-冲突以及防冲突算法研究
  - RFID标签数目估算机制研究
  - RFID系统的定位感知机制研究
- **具体要求与论文列表详见课程主页**
  - <http://cs.nju.edu.cn/lxie/IOT.htm>

# 专题参考书

## 射频识别技术：原理、协议与系统设计（第三版） 谢磊、陆桑璐 编著



用作本科生/研究生课程教科书：

- 本书自2014年出版发行以来，先后出版三版，已售2.6万多册。
- 包括清华大学、北京大学、浙江大学、中国科学技术大学、西安交通大学等120多所高校作为教材。
- 2020年入选南京大学研究生优秀教材，并通过江苏省教育厅推荐申报“全国教材建设优秀教材奖”。
- “物联网技术导论”课程入选南京大学研究生品牌慕课。

### 教材建设成效

- **新形态教材建设**：基于“微课”在线开放课程，进行线上自主学习
- **纸质教材+互联网载体**：二维码扫描即可获取课程内容的多媒体教学资源
- **自主研发软件工具集**：RF-Tools已在GitHub开源，被多个国际研究团队使用
- **追踪最新研究进展**：对最前沿的研究方向进展进行跟踪、总结和思考
- **构建课程实验网站**：提供实验内容、方案、代码、案例等多种素材

# RF-Tools软件开发工具集



## 自主研发RF-Tools软件开发工具集（开源）

- 支持RFID教学实验系统的软件开发环境，针对教学和科研中的共性开发需求，提供了一套完善的高级编程接口和示例程序。
- 方便学生在教学和科研工作中直接使用，减轻了系统程序开发的额外负担。

### RF-Tools简介



已经在GitHub开源平台上发布

<https://github.com/JJJennie4528/RF-Tools>

# 从“识别”到“感知”： 基于RFID的可标记无源感知技术研究

报告人： 谢磊

[lxie@nju.edu.cn](mailto:lxie@nju.edu.cn)

南京大学计算机软件新技术国家重点实验室

