

运输态势交互模型及其 CSP 形式化研究

陆锡高, 凌云翔, 老松杨

(国防科技大学信息系统与管理学院指挥自动化系, 长沙 410073)

摘要: 人机交互(HCI)技术的迅猛发展为自然高效和谐的 HCI 提供了基础支持, 随着 HCI 行为的日益复杂, 如何验证其过程的正确性成为研究 HCI 领域的重心。根据双手触摸光感应触控平台在运输态势的 HCI, 提出一种体现用户操作与设备响应相结合的运输态势 HCI 模型, 该模型采用通信顺序进程形式化描述, 并结合甘特图验证其单用户操作的逻辑正确性和稳定性。

关键词: 人机交互(HCI); 用户操作; 通信顺序进程; 形式化方法

Research of Transport Situation Interaction Model and Its CSP Formalization

LU Xi-gao, LING Yun-xiang, LAO Song-yang

(Department of Command Robotization, College of Information System and Management, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

【Abstract】 The rapid development of Human-Computer Interaction(HCI) technology provides a foundation support for natural, efficient and harmonious HCI. With the increasingly complex HCI behavior, how to verify the correctness of the course on HCI domain becomes an important aspect of the field. According to the two-handed of touch-sensors platform application in the transport situation HCI, this paper proposes a transport situation HCI model which embodies the combination of users' operations and equipment response, it adopts the Communicating Sequential Processes(CSP) to formalize it, combines with Gantt-chart verifying the logic accuracy and stability of its single user operating.

【Key words】 Human-Computer Interaction(HCI); user operation; Communicating Sequential Processes(CSP); formalization method

通信顺序进程(Communicating Sequential Processes, CSP)是 CAR. Hoare 于 1978 年提出的一种从计算机应用角度研究并发计算的代数模型, 基于进程代数, 表述一个系统或进程执行事件时续性以及系统行为间相互通信的特性, 能用代数演算方法验证人机交互(Human-computer Interaction, HCI)行为的正确性。在文中 CSP 通过进程事件集合和进程轨迹描述 HCI 系统的行为, 通过并发、选择、递归和非确定性等描述系统进程的关系, 因此, CSP 很适合 HCI 模型的构建。研究 CSP 在运输态势 HCI 模型上的应用, 旨在拓展该领域的形式化探索, 推动 HCI 模型形式化的发展。

1 运输态势 HCI 空间的应用背景

1.1 运输态势 HCI 空间的简述

国防科技大学等单位于 2006 年联合研制支持双手多指触摸的光感应触控平台, 运输态势 HCI 空间由该平台和相关 HCI 软件组成。从多视角、多视点、高清晰显示详细运输态势, 包括地理矢量信息和影像信息、二维 GIS 数据、三维实体模型和交通运输动态信息。提供智能化双手触摸交互方式, 使用户利用双手触摸代替鼠标操作进行运输态势的信息查询、多人研讨及交通运输方案的初步拟制。

以该平台在联合救灾指挥中的应用为例。当各种特大自然灾害发生时, 救灾的首要任务是向灾区运送大量救灾人员及物资, 决策指挥人员要及时、准确地把握灾区乃至全国的铁路、公路、水路和航空态势信息, 以便制定切实有效的运输方案, 为救灾工作赢得宝贵时间。联合救灾指挥的本质是群体决策过程, 在运输态势交互空间中的光感应触控平台作

为交通运输态势监控系统的一个重要组成部分, 其大屏幕可以动态显示实时运输态势信息, 提供多用户的共享视场。其触摸协作界面提供的 4 种任务分配模式为决策群体提供灵活的 HCI 处理机制, 实现运输态势图上信息的浏览、查询和研讨, 提高决策群体对各种运输态势信息的感知与理解。

1.2 HCI 的描述

在运输态势 HCI 空间内的人机对话, 是用户根据意愿对运输态势图的对象进行操作, 交互平台对此作出具体响应, 用户根据响应结果判断是否满足自身要求, 若满足则中断操作, 否则进行重新操作。本文分别从用户操作和交互平台响应 2 个方面对该类人机对话进行描述。

双手触摸操作是用户单手/双手在触控交互平台上触摸后的一系列动作, 它是模拟传统鼠标事件。标准鼠标有左键、右键、滚轮 3 个按键, 通过按下、抬起、移动和上下旋转滚轮等操作实现不同的功能(可依据需求自行定义)。双手交互方式利用人在现实生活中的劳动技能和技巧, 通过提高交互的自然性、和谐性以提高效率。下文结合鼠标操作的行为特点、人的认知特点和手部动作对双手操作手势进行分析。本

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2007AA01Z193); 国家科技支撑计划基金资助项目(2006BAG01A07)

作者简介: 陆锡高(1983-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 指挥决策分析, 人机交互模型; 凌云翔, 副教授、博士; 老松杨, 教授、博士、博士生导师

收稿日期: 2009-01-24 **E-mail:** chugou_55@yahoo.com.cn

文对双手操作状态模型的建立忽略了每只手以不同数量手指进行触摸的区别。每只手存在单手指、双手指和多手指触摸，在本文中均认为是单手指触摸，双手操作手势如表 1 所示。

表 1 双手操作手势

状态	手势定义	触摸事件	状态	手势定义	触摸事件
0	空状态	release	4	双手静止	dbtouch
1	单手静止	sgtouch	5	双手分开	dbdisjoin
2	单手移动	sgmove	6	双手合拢	dbjoin
3	单手旋转	sgrotate			

本文使用 FSM(有限状态机)描述双手操作状态间的转换关系。一般 FSM 用一个有向图 $G=(V, E)$ 表示，顶点集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为状态集，每个顶点对应一个状态，有向边集 $E=\{(v_i, v_j) | v_i, v_k \in V\}$ 为状态转换集。根据表 1 和文献[1]，建立如图 1 所示的用户操作状态的 FSM 描述，根据该双手操作状态转换关系，实现上述手势的任意转换。

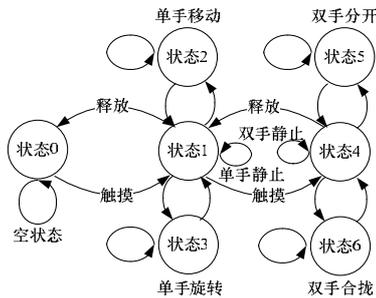


图 1 用户操作状态的 FSM 描述

运输态势 HCI 空间的核心是光感应触控平台，它提供上文描述的 4 大功能以满足业务需求，包括对象放大/缩小 (ZOOM)，地图漫游 (CRUISE)，态势信息查询 (QUERY) 和多人研讨 (DRAW) 等。根据人的认知特点，通过如表 2 所示的操作实现与平台功能的对接。

表 2 用户操作与平台功能的对接

触摸平台功能	放大/缩小	漫游	信息查询				研讨
			点查	线查	面查	视角变换	
用户操作	双手分开/双手合拢	单手移动	单手静止	双手双击	单手移动	单手旋转	单手移动

信息查询 (QUERY)：该功能较为复杂，因为在运输态势图上的信息多种多样，所以不同模式的信息查询需要不同的操作手势。对于运输态势 HCI 空间，包括二维运输态势信息和三维模型信息，构建三维模型是为了在运输态势 HCI 平台上直观展现重点基础设施，如大型港口码头、飞机场和火车站等，为上级拟制运输方案提供便利，二维运输态势的信息分类如图 2 所示。

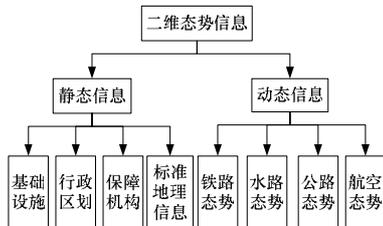


图 2 二维运输态势的信息分类

本文将查询方式设计为点查、线查和面查。其中，点查、面查针对在静态信息和动态信息上的单个运输工具；线查针对在具体运输线路上的所有交通工具。另外，三维视角变换也是运输态势信息查询的一个方面。

多人研讨 (DRAW)：通过实现一个画笔功能，使多用户可以共同在运输态势图上研讨。

交互平台响应由双手触摸事件触发，将用户与平台的交互 (亦即 4 大功能) 作为若干触摸事件及通信事件构成的进程。在每个功能完成后触摸平台转入空状态，空状态可以实现放大/缩小、漫游、信息查询、多人研讨不同功能的切换，交互平台状态的 FSM 描述如图 3 所示，该功能的切换依赖系统内部通信事件驱动。

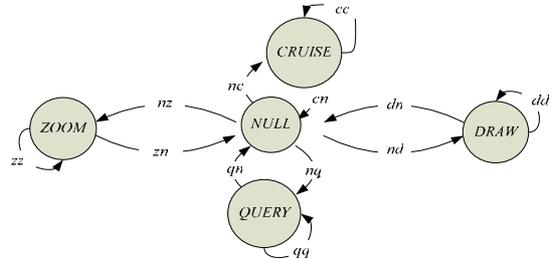


图 3 交互平台状态的 FSM 描述

按时序划分，运输态势空间多人 HCI 有以下 4 种协作任务分配模式，如图 4^[2]所示。它包括串行模式、并行模式、串并混合模式和穿插模式。触摸交互平台不能处于多种状态，如平台在 ZOOM 状态时只响应一个用户的操作，若另一个用户对平台进行触摸操作，系统会错误响应以致不能正确反映用户的操作意图，该错误定义为死锁。在多用户操作时要遵守以下规则：

- (1)L1 触摸平台在某个时刻只处于一种功能状态，用户不能在同一时刻对触摸平台进行多种功能操作。
- (2)L2 触摸平台只有在 DRAW 状态时，能响应多用户操作的并行模式、串并混合模式和穿插模式，否则触摸平台将不能正常响应。

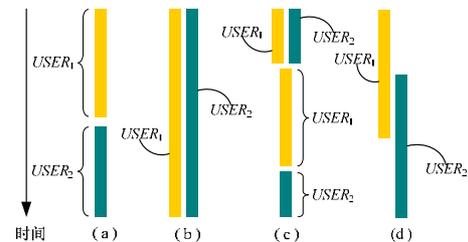


图 4 协作任务的分配模式

2 形式化描述与验证

2.1 模型的 CSP 描述

定义 1 设 P 为运输态势 HCI 系统的一个进程，它描述对象的行为特征样式，运输态势 HCI 系统是由一系列相互通信的进程交互构成的，其中， X, Y 表示进程变量。与进程相关的概念^[3-4]如下：

- (1)字母表。 aP 为构成进程的触摸事件与通信事件的集合。
- (2)前缀。 $(x \rightarrow P)$ 指在事件 x 执行后进程 P 按说明的动作执行。
- (3)轨迹。进程行为的轨迹指具体进程在时间范围内发生的有限次序事件记录，一般用 “ $\langle \rangle$ ” 内嵌 “ $,$ ” 表示。例如： $\langle x, y \rangle$ 表示某一进程由事件 x, y 组成，事件 x 后是事件 y ； $traces(P)$ 为构成进程 P 的轨迹集合， $traces(P)=\{\langle x, y \rangle, \langle x \rangle\}$ 。
- (4)后继。若 $s \in traces(P)$ ，则 P/s 是一个进程，该进程表

示 P 在执行完轨迹 s 所记录的事件后的行为。若 s 不属于 $traces(P)$, 则 P/s 无实际意义, 即 P 为死锁进程。

(5) 递归。前缀符号描述一个进程的全部行为, 直至终止, 用 $\mu X: A \times F(X)$ 表示。

(6) 通信。进程间的通信是一个进程经某一通道发出一个事件, 同时另一个进程从该通道上接收该事件。 $c!e$ 表示执行此命令的进程, 向通道 c 发出一个事件 e 。当进程在某一通道上接收事件时, 根据通道特性预料将接收的事件类型, 但不能预料具体数值。 $c?x: M$ 表示执行此命令的进程从通道 c 上接收通信事件在集合 M 中的元素。

(7) 选择。假设 x, y 表示不同的事件, $(x \rightarrow P | y \rightarrow Q)$ 表示系统进程的选择, 若事件 x 发生, 则进程 P 执行; 若事件 y 发生, 则进程 Q 执行。

(8) 非确定性。 $A = P \Pi Q$ 表示进程间的选择, 进程 A 按 P 动作或 Q 动作, 在两者中选一。

(9) 并发。进程 P 和 Q 的并发表示为 $P || Q$, 它代表在 P, Q 字母表中的事件要同步执行。

(10) 穿插。设进程 P 的轨迹为 $\langle x, y \rangle$, 进程 Q 的轨迹为 $\langle w, u \rangle$, 若进程 P 在执行事件 x 后, 进程 Q 立即执行事件 w , 则此进程 P 与进程 Q 的关系称为进程的穿插。

假设 $USER_i$ 为第 i 个用户与运输态势触摸平台的 HCI 行为, 用 CSP 对上述交互行为进行描述。

$aZOOM_i = \{i.dbtouch, i.dbdisjoin, i.dbjoin, i.release, nz, zn\}$

$ZOOM_i = \mu X: \{i.dbtouch, i.dbdisjoin, i.dbjoin, i.release, nz, zn\} \times (c?x: \{nz, zn\} \rightarrow (i.dbtouch \rightarrow (i.dbdisjoin \rightarrow i.release \rightarrow X \rightarrow c!zn | i.dbjoin \rightarrow i.release \rightarrow X \rightarrow c!zn)))$

$aQUERY_i = \{i.sgtouch, i.sgmmove, i.sgrotate, i.dbclick, i.release, nq, qn\}$

$QUERY_i = \mu X: \{i.sgtouch, i.sgmmove, i.sgrotate, i.dbclick, i.release, nq, qn\} \times (c?x: \{nq, qq\} \rightarrow (i.sgtouch \rightarrow i.release \rightarrow X \rightarrow c!qn) | (i.sgtouch \rightarrow i.sgmmove \rightarrow i.release \rightarrow X \rightarrow c!qn) | (i.sgtouch \rightarrow i.sgmmove \rightarrow i.rotate \rightarrow i.release \rightarrow X \rightarrow c!qn))$

$aCRUISE_i = \{i.sgtouch, i.sgmmove, i.release, nc, cn\}$

$CRUISE_i = \mu X: \{i.sgtouch, i.sgmmove, i.release, nc, cn\} \times (c?x: \{nc, cc\} \rightarrow i.sgtouch \rightarrow i.sgmmove \rightarrow i.release \rightarrow X \rightarrow c!cn)$

$aDRAW_i = \{i.sgtouch, i.sgmmove, i.release, nd, dn\}$

$DRAW_i = \mu X: \{i.sgtouch, i.sgmmove, i.release, nd, dn\} \times (c?x: \{nd, dd\} \rightarrow i.sgtouch \rightarrow i.sgmmove \rightarrow i.release \rightarrow X \rightarrow c!dn)$

第 i 个用户与触摸平台的交互用非确定性表示为:

$USER_i = ZOOM_i \Pi QUERY_i \Pi CRUISE_i \Pi DRAW_i$

用 CSP 形式化分别表示运输态势空间 HCI 的以下 4 种任务分配模式:

- (1) 串行模式, 用顺序进程表示为 $USER_1; USER_2$ 。
- (2) 并行模式, 用并发进程表示为 $USER_1 || USER_2$ 。
- (3) 混合模式, 用顺序进程与并发进程表示为 $USER_1 || USER_2; USER_1; USER_2$ 。

(4) 穿插模式, 用穿插进程表示为 $USER_1 ||| USER_2$ 。

在整个态势 HCI 空间内的用户操作与触摸平台响应可以用以上 4 种模式中的一种或多种进程组合表示。

定义 2 交互系统能响应所有触摸事件, 由于在时间切片上平台功能的互斥性, 因此当多用户进行并行或者穿插操作时可能出现错误响应导致进程无法正常终止, 此类进程称为死锁, 记为 $STOP$, 进程不存在死锁记为 $SKIP$ 。

当多用户在触摸平台上进行操作时, 系统可能正常终止, 可能进入死锁进程。根据上文的规则, 以 2 个用户为例描述

如下:

(1) 并行模式

If ($USER_1 == DRAW_1 \ \&\& \ USER_2 == DRAW_2$)
Then $USER_1 ||| USER_2 = SKIP$
Else $USER_1 ||| USER_2 = STOP$

(2) 穿插模式

If ($USER_1 == DRAW_1 \ \&\& \ USER_2 == DRAW_2$)
Then $USER_1 ||| ||| USER_2 = SKIP$
Else $USER_1 ||| ||| USER_2 = STOP$

(3) 混合模式是串行模式与并行模式的结合, 多用户操作进入混合模式时系统进程状态与并行模式一致。

2.2 用户操作与触摸平台交互正确性验证

上文对用户操作及触摸平台的交互进行了 CSP 描述, 其最终目的是为了证明上述运输态势交互的正确性, 即在态势交互过程中不存在死锁。

定理 1 设定 P 为一个进程, 如果存在轨迹 $s, s \in traces(P)$ 使得 $(P/s) = STOP$, 那么 P 是一个具有死锁行为特征的进程。死锁不存在的证明可形式化地描述为 $(P/s) \neq STOP$, 它对全部 $s \in traces(P)$ 都成立。

以下是对单用户操作与触摸平台交互的进程 $USER_i$ 正确性证明:

$traces(USER_i) = traces(ZOOM_i \Pi QUERY_i \Pi CRUISE_i \Pi DRAW_i)$, 当用户操作为 $ZOOM$ 时, $traces(USER_i) = traces(ZOOM_i \Pi QUERY_i \Pi CRUISE_i \Pi DRAW_i) = traces(ZOOM_i)$ 。 $ZOOM_i$ 的迹为 $\langle x, i.dbtouch, i.dbdisjoin, i.dbjoin, i.release, zn \rangle$, 其中, $x \in \{nz, zn\}$ 。对于轨迹 $s, s \in traces(ZOOM_i), ZOOM_i/s \neq STOP$ 。例如, 当 $s = \langle x, i.dbtouch \rangle$ 时, $(ZOOM_i/s) = ((i.dbdisjoin \rightarrow i.release \rightarrow ZOOM_i \rightarrow c!zn | i.dbjoin \rightarrow i.release \rightarrow ZOOM_i \rightarrow c!zn) \neq STOP$ 。

同理可证, 对全部 $s \in traces(P)$ 都有 $QUERY_i/s \neq STOP, CRUISE_i/s \neq STOP, DRAW_i/s \neq STOP$ (其中, $P = \{QUERY_i, CRUISE_i, DRAW_i\}$)。

以上证明了单用户操作的正确性。

多用户操作的证明过程较为复杂, 下文用甘特图证明其正确性, 以 2 个用户协作为例。

(1) 当 2 个用户操作为串行模式时, 实质是不同单用户按时间序列进行操作。由单用户与触摸平台交互的正确性可知, 此类模式进行的运输态势交互不存在死锁进程, 顺序进程如图 5(a) 所示, 可以成功终止。

(2) 当 2 个用户操作为并行模式时, 分 2 种情况: 1) 在触摸平台处于 $DRAW$ 状态时, 2 个用户都进行 $DRAW$ 操作, 此时进程不存在死锁, 即进程可以成功终止, 且用户的操作意图得以体现, 并发进程如图 5(b) 所示。2) 当触摸平台不处于 $DRAW$ 状态时或处于 $DRAW$ 状态时, 某一用户不进行 $DRAW$ 操作, 此时进程进入死锁状态, 触摸平台将不能正确响应用户的操作, 用户意图将得不到体现, 并发进程(死锁)如图 5(d) 所示。

(3) 当 2 个用户操作为穿插模式时, 与并行状态时的情况类似, 穿插进程见图 5(c)、穿插进程(死锁)如图 5(e) 所示。

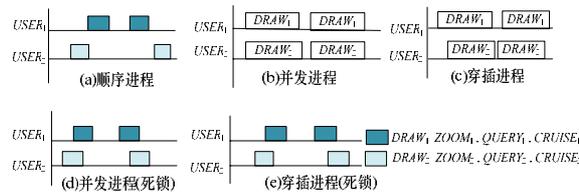


图 5 多用户操作的正确性验证