HAL open science

Proposition d'un Framework de Traitement de Traces pour l'Analyse de Connaissances Perceptivo-Gestuelles

Ben-Manson Toussaint, Vanda Luengo, Francis Jambon

To cite this version:

Ben-Manson Toussaint, Vanda Luengo, Francis Jambon. Proposition d'un Framework de Traitement de Traces pour l'Analyse de Connaissances Perceptivo-Gestuelles. 7ème Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH 2015), Jun 2015, Agadir, Maroc. pp.222-233. hal-01405951

HAL Id: hal-01405951

https://hal.science/hal-01405951v1

Submitted on 30 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Proposition d'un Framework de Traitement de Traces pour l'Analyse de Connaissances Perceptivo-Gestuelles

Le Cas de la Chirurgie Orthopédique Percutanée

Ben-Manson Toussaint[1,2], Vanda Luengo[1], Francis Jambon[1]
[1] Université Grenoble Alpes, 38406, St-Martin d'Hères, France
[2] Ecole Supérieure d'Infotronique d'Haïti, Port-au-Prince, Haïti
{ben-manson.toussaint, vanda.luengo, francis.jambon}@imag.fr

Résumé. Cet article présente un framework de représentation et de traitement de traces multi-sources hétérogènes provenant d'EIAH dédiés aux domaines impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles. La capture de traces perceptuelles et gestuelles dans un EIAH requiert l'utilisation coordonnée de plusieurs périphériques. La difficulté adressée est celle de produire une représentation cohérente des connaissances perceptivo-gestuelles à partir des traces hétérogènes générées par ces périphériques et de faciliter la production d'analyses didactiques et de services tutoriels sur la base de ces connaissances. Notre cas d'étude est le simulateur TELEOS, un Système Tutoriel Intelligent (STI) dédié à la chirurgie orthopédique percutanée. Le traitement des traces recueillies sur les simulations réalisées par des chirurgiens du CHU de Grenoble a permis d'analyser et de démontrer l'influence des perceptions visuelles sur les erreurs liées aux actions et gestes exécutés au cours d'une simulation de vertébroplastie.

Mots-clés. Systèmes Tutoriels Intelligents, traces hétérogènes, connaissances perceptivo-gestuelles, traces oculométriques, modélisation des connaissances.

Abstract. This article presents our proposed framework for processing heterogeneous multi-source traces recorded from Intelligent Tutoring Systems dedicated to domains involving visual-gestural knowledge. The capture of perceptual traces and gesture in simulated learning environments requires the coordinated use of multiple devices. The challenge that our proposition addresses is to produce a consistent representation of perceptual-gestural knowledge from heterogeneous traces generated by these devices that fosters learning analytics and/or tutorials services production congruent to this type of knowledge. Our case study is the simulation-based ITS dedicated to percutaneous orthopedic surgery, TELEOS. We demonstrated that the proposed representation and treatment of traces collected from 9 simulation sessions performed by surgeons of the Grenoble University Hospital, fostered the analysis of the influence of visual perceptions upon erroneous actions and gestures during vertebroplasty simulations.

Keywords. Intelligent Tutoring Systems, heterogeneous traces, perceptual-gestural knowledge, eye-tracking traces, knowledge modelling.

1 Introduction

Une connaissance est dite perceptivo-gestuelle quand elle combine des actions et/ou gestes avec des perceptions. Ces perceptions peuvent être auditives, tactiles ou visuelles. Leur rôle est d'accompagner la décision d'exécuter ou de valider des actions et/ou gestes. Cependant, les EIAH dédiés aux domaines impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles écartent souvent le côté perceptuel de ces connaissances. L'une des raisons possibles est liée au fait que ces connaissances sont souvent tacites et empiriques et de ce fait difficiles à capter et à modéliser. En effet, la capture des connaissances perceptivo-gestuelles implique l'utilisation de périphériques de détection des gestes et des perceptions. Par exemple, l'oculomètre pour l'enregistrement de perceptions visuelles, le bras à retour d'effort pour les perceptions haptiques, la technologie Kinect pour la reconnaissance de postures, etc. L'inconvénient immédiat de l'utilisation de plusieurs périphériques vient de l'hétérogénéité des traces produites. Pour produire des services tutoriels sur la base de ces traces, le principal défi est de les transformer en séquences qui reflètent de manière cohérente l'aspect perceptivo-gestuel des actions qu'elles représentent.

Le framework présenté dans cet article est une proposition d'approche de ce défi. Notre cas d'étude est TELEOS, un Système Tutoriel Intelligent (STI) basé sur la simulation, dédié à la chirurgie orthopédique percutanée. Les interventions percutanées en chirurgie, aussi désignées sous le terme « interventions chirurgicales mini-invasives », se réalisent à travers la peau du patient. Dans ce type d'opération, le chirurgien ne dispose de quasiment aucune visibilité directe sur la progression de ses outils. Il est guidé par des radiographies. Il valide ses gestes et actions sur la base des contrôles visuels effectués sur des points précis de celles-ci. Le chirurgien adapte aussi son geste selon le rendu haptique du contact des outils avec différentes parties du corps du patient sur leur trajectoire. Par conséquent, la réussite d'une opération requiert la maîtrise de la coordination des analyses visuelles des radiographies, des connaissances anatomiques et de l'interprétation des résistances ressenties sur l'outil à différents points de progression.

L'objectif de la présente étude est double. Il s'agit de proposer une représentation de traces multi-sources hétérogènes en séquences perceptivo-gestuelles reflétant de manière cohérente les connaissances mises en jeu, et d'analyser l'influence des perceptions représentées dans ces séquences sur les performances de l'apprenant. Dans l'expérimentation présentée, nous nous concentrons sur les perceptions visuelles. La suite de l'article est structurée ainsi: la 2e partie présente des travaux connexes sur la prise en compte des perceptions dans un contexte d'apprentissage; la 3e section décrit la méthodologie de capture des actions, gestes et perceptions pour notre cas d'étude, TELEOS ; la 4e section décrit le framework proposé et le processus de traitement des traces ; la 5e section présente les résultats de l'évaluation du lien existant entre les perceptions visuelles des internes et leurs performances au cours d'une session de simulation et la 6e partie, nos conclusions et perspectives.

2 Travaux Connexes

La littérature rapporte des travaux marquants sur la production de services didactiques pour des EIAH dédiés à des domaines impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles. Cependant, l'emphase est souvent exclusivement portée sur les actions et les gestes. Par exemple, les perceptions visuelles en pilotage sont cruciales pour les contrôles de l'état de l'appareil et des changements de l'environnement au cours d'un vol. Pourtant, les services didactiques des principaux STI dédiés au pilotage se concentrent sur les actions dans l'application des procédures de vol [10, 11]. Il en va de même pour la conduite automobile [16, 17] quoique l'environnement dynamique marque particulièrement l'importance des perceptions qui sous-tendent les décisions relatives à l'exécution de certaines actions. Le travail le plus récent sur un STI adressant des connaissances gestuelles est CanadarmTutor [3] conçu pour entrainer les astronautes de la station spatiale internationale à la manipulation d'un bras robotique articulé. Les apprentis pratiquent les manipulations consistant à faire passer le bras d'une configuration à une autre. Cet exercice requiert une progression guidée par des caméras à chaque étape de la scène d'opération. Des patterns d'actions sont extraits des traces d'activité du STI pour modéliser les décisions qui sous-tendent les gestes conduisant à des solutions. Cependant, les perceptions visuelles qui sont mises en jeu lors de la guidance ne sont pas prises en compte. Pour notre part, nous faisons l'hypothèse que les perceptions apportent des précisions non triviales sur les informations recueillies par l'apprenant pour supporter les décisions relatives à l'exécution de ses actions.

D'autres travaux ont été conduits sur l'analyse des perceptions en contextes d'apprentissage. Toutefois, ils se concentrent généralement sur l'intérêt des perceptions à expliciter des comportements. Par exemple, les perceptions visuelles sont analysées pour déduire les compétences métacognitives dans l'apprentissage exploratoire [1] ou encore les capacités cognitives du sujet au cours d'une tâche de visualisation [13]. Certains chercheurs utilisent aussi les informations perceptuelles pour détecter l'effort déployé par l'apprenant dans un contexte d'évaluation [5] ou inférer son comportement dans le processus d'apprentissage [2, 8]. Dans d'autres études, des périphériques de prise d'informations perceptuelles sont utilisées pour capter les postures, les expressions faciales et la gestuelle comme des signaux émotionnels [12]. De notre côté, nous nous intéressons aux perceptions comme modalité à part entière de connaissances multimodales mises en jeu.

3 Capture de Traces Perceptuelles et Gestuelles : le cas TELEOS

En chirurgie mini-invasive, les radiographies constituent le principal retour d'information sur la trajectoire des outils chirurgicaux dans le corps du patient. Les retours haptiques des outils constituent des informations perceptuelles de guidage complémentaires pour le chirurgien. Pour capter ces interactions, nous utilisons un oculomètre [4] et un bras haptique [6] en complément du logiciel de simulation. L'exemple d'opération traité dans cet article est la vertébroplastie, une chirurgie mini-invasive pratiquée pour le traitement des fractures vertébrales.

3.1 Capture de Perceptions Visuelles

L'interface de simulation est divisée en plusieurs zones d'intérêt (*Cf.* Fig. 1.a) : la zone d'affichage du modèle 3D du patient ; les zones d'affichage des radiographies; et le tableau de réglages comprenant trois sous-sections : le tableau de réglages de l'appareil de radioscopie ou fluoroscope, le tableau de manipulation de la réglette pour le marquage de repères cutanés destinés à cibler l'os affecté et le tableau de manipulation de l'outil de guidage des instruments chirurgicaux ou trocart.

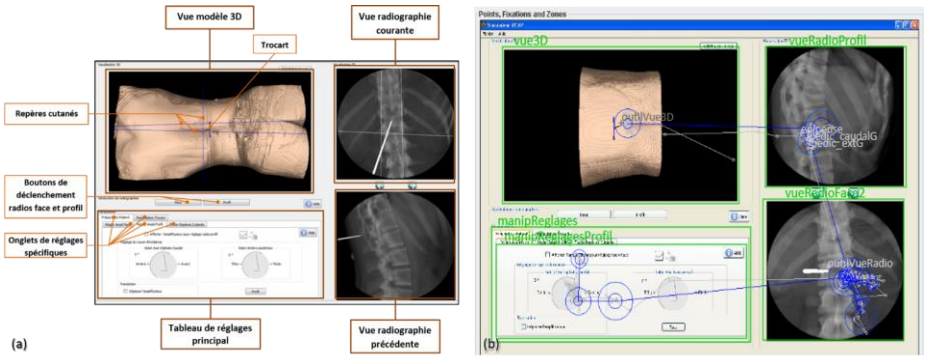

Fig. 1. a) L'interface du simulateur TELEOS. b) Parcours visuel de l'apprenant.

La zone d'intérêt associée à l'affichage de la radiographie courante comporte des points d'intérêt devant être prises en compte sur la vertèbre pour la validation de la trajectoire d'insertion du trocart. Telle qu'illustrée dans la Fig. 2, l'identification des points d'intérêt est effectuée à partir des coupes en deux dimensions du scan de la colonne vertébrale du patient. Les coordonnées de ces points sont enregistrées dans les métadonnées du cas clinique. Lorsque celui-ci est sélectionné comme exercice, les points enregistrés sont projetés sur les radiographies produites par l'apprenant. Un outil d'analyse de fixations intégré au simulateur permet d'analyser le parcours visuel de l'apprenant en temps réel [4]. La Fig. 1.b illustre un parcours visuel à travers les zones d'intérêt de l'interface et certains points d'intérêt à l'intérieur de ces zones.

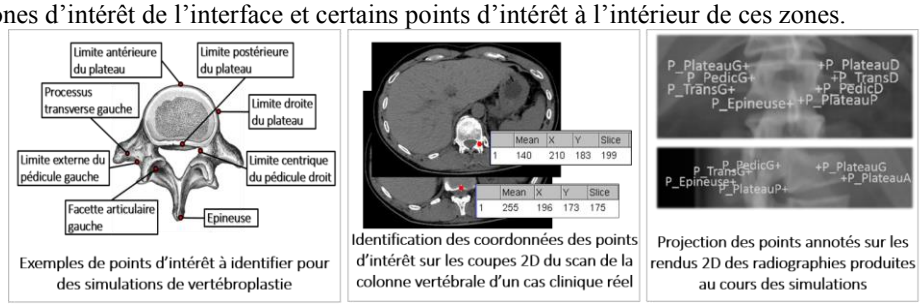

Fig. 2. Identification et annotation des points d'intérêt des vertèbres.

Une distinction est faite entre deux catégories de fixations : 1) Les fixations de vérification effectuées dans l'objectif de recueillir les informations nécessaires à la vérification conduisant éventuellement à la validation d'une action déjà exécutée.

Elles sont portées sur l'état courant des outils –le fluoroscope et le trocart– et sur des points d'intérêt spécifiques renvoyés par les radiographies prises ; 2) Les fixations de décision traduisant l'intention ou la décision d'exécuter une nouvelle action. Elles sont portées sur les commandes des outils. Cette distinction est pertinente d'un point de vue didactique dans la mesure où elle précise l'intention de l'interne et, par-là, sa stratégie de vérification et de validation des actions exécutées et plus globalement sa stratégie de réalisation d'une opération.

3.2 Capture d'Actions Ponctuelles

Le simulateur enregistre des traces de manière ponctuelle à l'exécution d'une action. Il s'agit des actions liées aux réglages du fluoroscope, au tracé des repères cutanés et à la manipulation du trocart. Chaque action peut être définie comme une photographie de l'environnement de simulation au moment de son exécution. En effet, à chaque occurrence d'une action du simulateur les coordonnées des positions des différents outils de l'environnement sont enregistrées. Dès lors, une action est caractérisée non seulement par son nom mais aussi par les positions des outils de l'environnement de simulation au même moment. Par exemple, deux prises de radio de face seront différentes si le positionnement du fluoroscope a changé entre les deux exécutions.

3.3 Capture de Gestes et de Perceptions Haptiques

Le geste chirurgical inclut les types de préhension des outils chirurgicaux, les niveaux de forces appliquées selon l'étape de progression et les inclinaisons, orientation et direction d'insertion des outils. Le recueil des données nécessaires à la modélisation des gestes chirurgicaux pour la vertébroplastie a été réalisé sur des maquettes de patients. L'instrumentation nécessaire incluait notamment des dynamomètres positionnés dans les maquettes pour pouvoir recueillir les données relatives aux niveaux de force appliqués sur le trocart et à la vitesse de progression de celui-ci à des points de progression importants. Les principaux points de progression considérés pour une vertébroplastie sont le contact cutané, le contact osseux, l'entrée pédiculaire, la traversée du corps vertébral jusqu'au point de validation de la trajectoire du trocart L'intérêt cognitif de l'entrainement au positionnement des instruments et à l'adaptation du geste chirurgical sur la base des résistances perçues durant leur progression dans une trajectoire d'insertion, a été démontré dans [7].

4 Traitement des Traces Multi-sources

Dans le cas de TELEOS, les traces provenant des trois sources décrites dans la section 3 sont enregistrées séparément. Elles sont hétérogènes au niveau du type et du format de leur contenu et au niveau de leur granularité temporelle. Les traces envoyées par le logiciel de simulation et l'oculomètre sont alphanumériques alors que celles envoyées

par le bras haptique sont numériques. Le nombre de paramètres enregistrés pour les traces de chaque source varie aussi. Ainsi, les traces du logiciel de simulation comptent chacune 54 paramètres, celles provenant du bras haptique en comptent 15 et celles issues de l'oculomètre, 6. Enfin, les traces de l'oculomètre et du bras haptique sont enregistrées en continu tandis que celles du simulateur sont produites et enregistrées de manière ponctuelle à l'exécution d'une action. Le framework proposé pour le traitement de ces traces multi-source et hétérogènes met en œuvre, sous la forme d'un processus, une suite de logiciels à fonction unique que nous appelons des opérateurs. La Fig. 3 en présente le schéma. Les opérateurs en gris ne sont pas utilisés dans cette étude. Les opérateurs de préparation et de transformation permettent de produire des séquences perceptivo-gestuelles à partir de traces brutes multi-sources. Les opérateurs avancés offrent des fonctions dédiées à l'analyse statistique de l'apprentissage et à l'extraction de connaissances à partir des séquences ainsi représentées. Nous présentons dans la suite les principaux opérateurs utilisés dans cette étude.

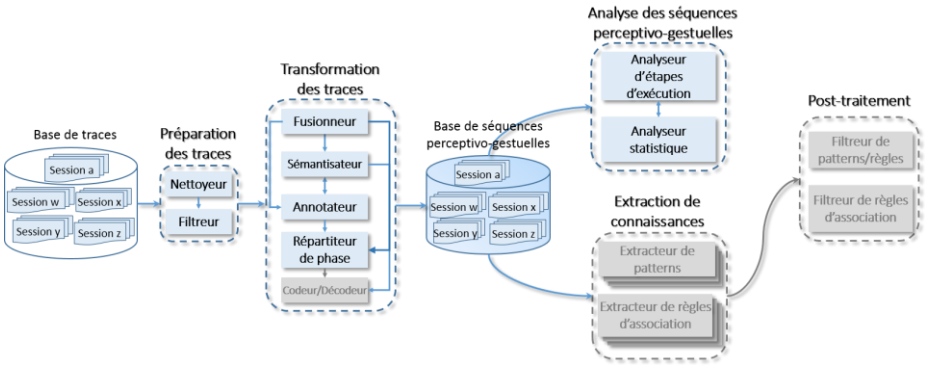

Fig. 3. Schéma de fonctionnement du framework proposé

4.1 Le Fusionneur

Le « fusionneur » réunit les traces multi-sources sur la base de leur correspondance séquentielle. En d'autres mots, les paramètres des traces des différentes sources dont les timecodes correspondent sont fusionnés. La fusion est effectuée sans perte sur la séquentialité des occurrences des actions, perceptions et gestes. Dans le cas de TELEOS, chaque action du simulateur est associée à plusieurs traces de l'oculomètre et du bras haptique. Par exemple, si l'interne cherche à positionner le trocart, l'action *Placer_Trocart* va être envoyée par le simulateur. Les différentes manipulations (déplacements, force, vitesse) destinés à placer l'outil dans la position et l'inclinaison idoines pour une insertion sont enregistrées par le bras haptique. Les points visualisés sur la radiographie prise et sur le modèle 3D sont enregistrés par l'oculomètre. Plusieurs points de fixations et plusieurs gestes correspondent donc à une occurrence de l'action *Placer_Trocart*. L'opérateur fusionnera les paramètres des différentes traces tout en gardant l'ordre temporel de leur occurrence.

4.2 Le Sémantisateur

Le « sémantisateur » permet d'attribuer une dénomination sémantique aux manipulations et états des outils dont l'évolution des paramètres se caractérise par des traces brutes numériques. Un état désigne le positionnement des outils de l'environnement de simulation à l'exécution d'une action. L'intérêt est de produire des séquences qui rendent compte d'informations précises sur ces outils avant, pendant, et après l'exécution d'une action. Dans notre cas d'étude, les traces ne rapportent que les nouvelles coordonnées des positions des outils quand ils sont manipulés. Pour caractériser les changements résultant de ces manipulations, l'opérateur de sémantisation utilise les coordonnées de la séquence courante rapportant les nouvelles positions des outils et les coordonnées de la séquence précédente par rapport auxquels le changement effectué sera caractérisé. Les séquences produites à cette étape traduisent par une dénomination sémantique non seulement les conséquences de la manipulation des outils sur leur positionnement, mais aussi la manière dont cette manipulation a été effectuée. Cette information peut être discrète (*ex. :* « *Le trocart a une inclinaison caudale* »), ou continue (*ex. :* « *Le trocart est incliné rapidement dans l'axe caudal* »).

Le tableau 1 présente un exemple de séquences de traces avec des coordonnées brutes et le résultat de la sémantisation. Dans cet exemple, par souci de simplification, seules les coordonnées du trocart ont été sélectionnées. Le dernier état connu de tous les outils est rapporté d'une séquence à l'autre : on peut remarquer dans la séquence sémantique S2-S1 que le dernier état connu du fluoroscope est mentionné ainsi que le dernier état connu du trocart même si la séquence ne rapporte aucune manipulation de ce dernier entre S1 et S2. Si cela est jugé nécessaire dans les traitements visés, l'opérateur permet aussi de caractériser les perceptions visuelles sur la base de leur durée en fixations brèves, normales ou prolongées.

Tableau 1. Sémantisation des coordonnées des outils

Traces fusionnées					
	Timecode	**Actions simulateur**	**Coordonnées manche et pointe du trocart**		**Perceptions, durée en ms**
S1	1370432727	Controle_Face	(150.126, -115.484, 114.948) (153.729, 6.744, 153.264)		manipReglage, 1109 (outil_vue3D vue3D, 2757)
S2	1370432729	Placer_Trocart	(150.126, -115.484, 114.948) (153.729, 6.744, 153.264)		(outil_vueRadio vueRadioFace, 359) vueRadioFace, 3717
S3	1370432734	Controle_Face	(141.384, -114.981, 120.160) (153.729, 6.744, 153.264)		(O_outil_vue3D O_vue3D, 280) O_manipReglage, 14284
Séquences sémantiques					
	Timecode	**Actions simulateur**	**Actions trocart**	**Etats des outils**	**Perceptions**
S2-S1	1370432729	Placer_Trocart	Aucune	AmpliProfil_inclinaison_craniale* Trocart_inclinaison_droite* Trocart_nonInsere	(O_outil_vueRadio O_vueRadioFace) O_vueRadioFace
S3-S2	1370432734	Controle_Face	Trocart_translation_droite Trocart_translation_anterieure	AmpliProfil_inclinaison_craniale Trocart_nonInsere	(O_outil_vue3D O_vue3D) O_manipReglage_1**
* Dernier état connu du fluoroscope et du trocart. **Suffixe traduisant une fixation prolongée (relativement au domaine)					

4.3 L'Annotateur

L'opérateur d'annotation permet d'annoter les séquences perceptivo-gestuelles avec des évaluations expertes. Dans le cas de TELEOS, ces évaluations sont effectuées par un réseau bayésien à partir d'un ensemble d'éléments de connaissances experts désignés sous le terme de « contrôles ». Ceux-ci sont utilisés par le réseau bayésien comme référence pour évaluer l'état des connaissances de l'apprenant. Les résultats de ces évaluations (ex : correct ou incorrect), sont portés par les « variables de situation » [9]. Le tableau 2 présente quelques exemples de contrôles et de variables de situation ainsi que les actions auxquelles ils sont associés et les étapes de la simulation où ces actions peuvent être exécutées.

Tableau 2. Exemples de contrôles et de variables de situation

Action	Etape	Contrôle	Variable de situation
Prendre une radio de face	Réglages	La vertèbre ciblée doit être au centre de la radio	Position de la vertèbre sur la radio de face
Vérifier la position du trocart sur une radio de profil	Insertion	Au point d'entrée cutané, le trocart doit être dirigé vers le pédicule	Orientation du trocart à l'entrée cutanée

L'annotateur de notre framework récupère les variables de situation et leurs résultats et les rattache aux séquences pour lesquelles elles ont été calculées. De manière conceptuelle, une annotation (variable de situation, dans notre cas d'étude) représente une action du système en réponse à un ensemble d'interactions de l'apprenant. Elle est donc représentée dans une séquence, comme tous les autres éléments d'interaction enregistrés, sous la forme d'un ensemble d'items dont l'occurrence intervient après celle de ces éléments d'interaction.

4.4 Le répartiteur de phase

Pour des exercices dont la résolution implique différentes phases, le répartiteur de phase identifie automatiquement la phase à laquelle appartient chaque trace enregistrée. Pour ce faire, l'opérateur prend en entrée les listes prédéfinies des actions de chaque phase ou la liste des paramètres caractérisant chaque phase. Il procède en analysant les traces et en lui attribuant un tag faisant référence à la phase [15]. A cette étape du traitement, nous obtenons une représentation des séquences perceptivo-gestuelles à partir de laquelle on peut effectuer des traitements avancés d'analyse de l'apprentissage et d'extraction de connaissances.

4.5 L'Analyseur d'Etapes d'Exécution

L'analyseur de parcours d'exécution permet d'enregistrer les validations d'étapes et les retours sur étape observés pour un environnement d'apprentissage dont les

exercices impliquent une résolution par étapes. La simulation de la vertébroplastie se réalise sur trois étapes consécutives : réglages de l'appareil de radioscopie, repérage cutané et insertion du trocart. Le passage d'une étape à l'autre est linéaire. Cependant, le simulateur ne contraint pas l'évolution de la simulation dans un sens : l'interne peut circuler librement entre les étapes au cours d'une session. Par contre, il faut souligner que chaque retour sur étape est motivé par la correction d'actions injustement validées. Pour chaque session analysée, l'opérateur enregistre les actions effectuées à chaque point du parcours ainsi que les fixations de vérification et les fixations de décision supportant chacune de ces actions.

5 Evaluations et Discussion

Pour cette étude, nous faisons l'hypothèse que les traitements proposés pour la représentation des traces multi-sources hétérogènes génèrent des séquences perceptivo-gestuelles permettant de faire le rapprochement entre les erreurs des internes (variables de situation incorrectes et erreurs de validation) et leurs perceptions visuelles.

5.1 Données

Les traces utilisées pour cette étude proviennent de 9 sessions de simulation de vertébroplastie réalisées par 5 internes et 1 chirurgien expert du département d'Orthopédie Traumatologie du CHU de Grenoble. Hormis l'expert aucun des sujets n'avait utilisé le simulateur auparavant. Les exercices de simulation consistaient à traiter une fracture de la 11e et/ou 12e vertèbre thoracique. Avant de commencer, chaque sujet a visionné une vidéo de présentation du simulateur puis effectué une session de prise en main. Le Tableau 3 détaille les données recueillies et traitées.

Tableau 3. Traces collectées et traitées *(# : nombre ; p-g : perceptivo-gestuelle ; VS : variable de situation)*

Profil	N° Session	Vertèbre opérée	#Traces brutes	#Séquence p-g annotées	#Fixations	#VS incorrectes	#Erreurs validation	#Séquences correction
Interne	S01	11e T	2702	113	2033	750	9	11
Interne	S02	11e T	1636	37	885	178	4	4
Interne	S03	12e T	118	33	690	208	3	5
Interne	S04	11e T	5107	128	2482	644	10	39
	S05	12e T	1677	41	858	174	6	10
Expert	S06	11e T	3432	59	1452	249	4	31
	S07	12e T	1828	47	1040	239	5	9
Interne	S08	11e T	5068	117	2514	644	20	36
	S09	12e T	1496	41	869	193	4	22

5.2 Résultats

Le nombre de séquences variant beaucoup d'une session à l'autre, nous utilisons le nombre moyen de fixations par séquence qui traduit mieux la tendance des analyses visuelles que le simple nombre des fixations. Il en va de même pour les variables de situation incorrectes. Les erreurs de validations traduisent le nombre de changements de phase dans le but d'effectuer des corrections liées à des validations erronées. Nous nous intéressons au nombre d'erreurs de validation commises dans une session, le nombre d'actions consacrées à la correction de ces erreurs ainsi que les perceptions liées à ces actions de correction. Le graphique de la Fig. 4.a résume la distribution des fixations, des variables de situation incorrectes et des erreurs de validation. La session avec la plus grande moyenne de fixations (24,6) rapporte 19% moins de variables de situation incorrectes que les autres. On peut constater la même relation entre les analyses visuelles et les erreurs de validation pour l'ensemble des sessions étudiées, excepté pour la session *S08*. En effet, cette session rapporte une forte moyenne d'analyses visuelles (21,5) mais néanmoins beaucoup d'erreurs de validation (20). Cela s'explique par le fait que le sujet exécute à la fois peu d'actions de correction et très peu d'analyses visuelles pour supporter ces actions. En effet, dans le graphique b de la Fig. 4, on constate que cette session a une faible moyenne de séquences liées à des corrections (1,8) lors d'un retour sur étape, couplée à la plus faible moyenne de fixations de la série (15,5) pour ces corrections.

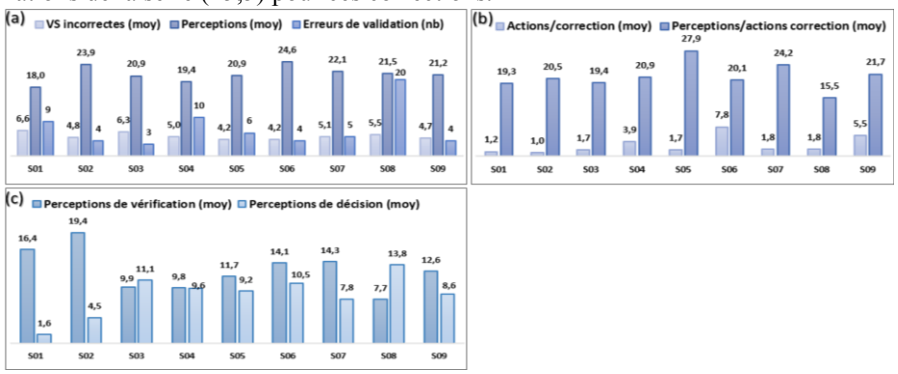

Fig. 4. a) Histogramme des variables de situation incorrectes, fixations et erreurs de validation ; b) Histogramme des séquences liées à une correction et des fixations supportant ces séquences ; c) Histogramme des fixations de vérification et de décision

En comparaison, la session *S02* rapporte la plus faible moyenne d'actions de corrections (1,0. *Cf. Fig. 4.b*) mais suffisamment d'analyses visuelles (20,5. *Cf. Fig. 4.b*) pour consolider les décisions de validation et limiter les erreurs (4. *Cf. Fig. 4.a*). De plus, on peut constater sur la Fig. 4.c qu'une faible part des fixations de la session *S08* est dédiée à des analyses visuelles de vérification (7,7 contre 13,8 pour les fixations liées à la décision). La session *S09* a été réalisée par le même sujet mais on observe moins d'erreurs de validation et moins de variables de situation incorrectes car tout en ayant sensiblement le même taux de fixations, son comportement lié aux analyses visuelles s'est inversé et il consacre plus d'actions à la correction des erreurs.

6 Conclusion et Perspectives

Les connaissances perceptuelles et gestuelles sont difficiles à capter dans les EAIH, notamment parce que cela implique l'utilisation de plusieurs périphériques produisant des traces hétérogènes difficiles à traiter dans un objectif d'analyse de l'activité d'apprentissage. Nous avons présenté dans cet article notre méthodologie pour la capture et le traitement de traces perceptuelles et gestuelles produites sur TELEOS, un Système Tutoriel Intelligent dédié à la chirurgie orthopédique percutanée. Le framework proposé pour le traitement des traces multi-sources permet d'aboutir à une représentation cohérente des séquences d'actions où des connaissances perceptivo-gestuelles sont mises en jeu. Nous avons aussi démontré que les comportements de l'apprenant liés aux perceptions visuelles pouvaient être analysés de manière pertinente à partir de la représentation proposée. Les résultats de notre étude ont révélé une influence forte du comportement relatif aux analyses visuelles sur les erreurs commises au cours d'une session de simulation.

Nous projetons d'intégrer l'analyse de ces comportements directement au niveau du module de diagnostic des connaissances du simulateur et de tester le gain effectif de la qualité des résultats produits. En outre, ces traitements rendent désormais possible la production de rétroactions adaptatives ciblant à la fois les actions, les perceptions et les gestes. Nous pouvons donc envisager un guidage pédagogique basé sur le comportement de l'apprenant lié aux perceptions.

D'autre part, nous envisageons de tester la généricité de notre framework pour d'autres domaines impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles. A la rédaction de cet article, la mise en place d'une expérimentation sur des données provenant d'un simulateur de vol est en cours.

Remerciements. Ce travail est partiellement financé par le LabEx PERSYVAL-Lab (ANR-11-LABX-0025-01). Les auteurs remercient Elena Elias pour sa contribution à la collecte de données et Nadine Mandran, pour la relecture de l'article.

Références

1. Conati, C., Merten, C.: Eye-tracking for user modeling in exploratory learning environments: An empirical evaluation. Knowl.-Based Syst, Vol. 20(6) (2007) 557-574
2. D'Mello, S. Olney, A., Williams, C., Hays, P.: Gaze tutor: A gaze-reactive intelligent tutoring system. Int. J. Hum.-Comput. Stud., Vol. 70(5) (2012) 377-398
3. Fournier-Viger, P., Nkambou, R., Mayers, A., Mephu Nguifo, E., Faghihi, U. A Hybrid Expertise Model to Support Tutoring Services in Robotic Arm Manipulations. In Proceedings of the 10th Mexican International Conference on Artificial Intelligence. LNAI 7094, Springer, (2011) 478–489
4. Jambon, F., Luengo, V. : Analyse oculométrique « on-line » avec zones d'intérêt dynamiques : application aux environnements d'apprentissage sur simulateur. In Actes de la Conférence Ergo'IHM sur les Nouvelles Interactions, Créativité et Usages, Biarritz France (2012)

5. Lach, P.: Intelligent Tutoring Systems Measuring Student's Effort During Assessment. In: Zaïane, O.R. and Zilles, S. (eds.): Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7884. Springer, Berlin Heidelberg (2013) 346-351
6. Luengo, V., Larcher, A., Tonetti, J.: Design and implementation of a visual and haptic simulator in a platform for a TEL system in percutaneous orthopedic surgery. In Medecine Meets Virtual Reality 18. (eds.): Westwood J.D., Vestwood, S.W. (2011) 324–328
7. Luengo, V., Vadcard, L., Tonetti, J., Dubois, M.: Diagnostic des connaissances et rétroaction épistémique adaptative en chirurgie. In Revue d'Intelligence Artificielle, Lavoisier. Hermes Science Publications, Vol. 25 (4), (2011) pp.499-524.
8. Mathews, M., Mitrovic, A., Lin, B., Holland, J., Churcher, N.: Do Your Eyes Give It Away? Using Eye Tracking Data to Understand Students' Attitudes towards Open Student Model Representations. In: Cerri, S.A., Clancey, W.J., Papadourakis, G., Panourgia, K. (eds.): Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7315. Springer, Berlin Heidelberg (2012) 422-427
9. Minh Chieu V., Luengo V., Vadcard L.: Student Modeling in Orthopedic Surgery Training: Exploiting Symbiosis between Temporal Bayesian Networks and Fine-grained Didactical Analysis. In International Journal of Artificial Intelligence in Education 20. IOS Press. (2010) 269-301
10. Mulgund, S.S., Asdigha, M., Zacharias, G. L., Ma, C., Krishnakumar, K., Dohme, J.A., Al, R.: Intelligent Tutoring System for Simulator-Based Helicopter Flight Training. Flight Simulation Technologies Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics Baltimore MD U.S.A. (1995)
11. Remolina, E., Ramachandran, S., Fu, D., Stottler, R., Howse, W.R.: Intelligent Simulation-Based Tutor for Flight Training. In: Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference. (2004) 1-13
12. Ríos, H.V., Solís, A.L., Aguirre, E., Guerrero, L., Peña, J., Santamaría, A.: Facial Expression Recognition and Modeling for Virtual Intelligent Tutoring Systems. In: Cairó, O., Sucar, L.E., Cantu, F.J. (eds.): Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1793. Springer, Berlin Heidelberg (2000) 115-126
13. Steichen, B., Carenini, G., Conati, C.: User-adaptive information visualization: using eye gaze data to infer visualization tasks and user cognitive abilities. In: Proceedings of the 2013 Int. Conf. on Intelligent User Interfaces. ACM, New York NY USA (2013) 317-328.
14. Tonetti, J., Vadcard, L., Girard, P., Dubois, M., Merloz, P. Troccaz, J.: Assessment of a percutaneous iliosacral screw insertion simulator. In Proceedings of the Conference Clinical Orthopaedics and Related Research. (2009) 471-477
15. Toussaint, B-M., Luengo, V.: Mining Surgery Phase-Related Sequential Rules from Vertebroplasty Simulations Traces. To be published in the Proc. of the 15th International Conference on Artificial Intelligence in Medicine (AIME 2015). Pavia, Italy (2015)
16. Weevers, I., Kuipers, J., Brugman, A.O., Zwiers, J., van Dijk, E.M.A.G., Nijholt, A.: The Virtual Driving Instructor, Creating Awareness in a Multi-Agent System. In: Xiang, Y., Chaib-Draa, B. (eds.): Proceedings of the 16th Canadian society for computational studies of intelligence conference on Advances in artificial intelligence. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2003) 596-602.
17. de Winter, J.C.F., de Groot, S., Dankelman, J., Wieringa, P.A., van Paassen, M.M., Mulder, M.: Advancing simulation-based driver training: lessons learned and future perspectives. In Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services. ACM, New York NY USA (2008) 459-464.