



VII

CONGRESO
NACIONAL DE
TECNOLOGÍA
APLICADA A
CIENCIAS DE
LA SALUD

16-18
junio 2016
Unidad de Seminarios, BUAP

"GENERACION DE NUEVAS TECNICAS DE DIAGNOSTICO Y TRATAMIENTO"



Sistema de simulación de interacción háptica en reparación de aneurismas en neurocirugía: primeras experiencias en el análisis de destrezas médicas

David A. Soriano Valdez¹, Sergio Teodoro Vite¹, César A. Victoria Ramírez¹, Alfonso Gastélum Strozzi^{1,*}, Kanako Harada², Hirofumi Nakatomi³, Shono Naoyuki³, Naohiko Sugita², Miguel A. Padilla-Castañeda^{1,+}

¹Unidad de Desarrollo Tecnológico en el Hospital General de México Dr. Eduardo Liceaga, CCADET, UNAM

²Department of Mechanical Engineering, University of Tokyo

³Department of Neurosurgery, Tokyo Metropolitan Police Hospital

*alfonso.gastelum@ccadet.unam.mx

+miguel.padilla@ccadet.unam.mx

RESUMEN

El avance en el desarrollo de simuladores quirúrgicos permite recrear situaciones reales a las que se enfrentan los cirujanos de manera habitual, en la actualidad la calidad de las simulaciones permite recrear la mayor parte de los fenómenos físicos que se derivan de la interacción del cirujano con los tejidos biológicos. Debido a lo anterior, es que se abre una nueva posibilidad, la cual es el análisis de técnicas empleadas por los cirujanos, así como el análisis de destrezas y habilidades que poseen los cirujanos. En este trabajo se presenta un sistema de simulación con el cual se propone la apertura mínima del cráneo requerida por un cirujano para realizar los movimientos necesarios a fin de manipular un aneurisma sacular y estar en posición para repararlo.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de simulación médica son sistemas complejos que combinan técnicas avanzadas de computación gráfica y robótica que tienen el potencial de permitir a los cirujanos entrenarse en procedimientos quirúrgicos complejos de manera segura, intensiva en condiciones controladas, sin poner en riesgo la salud de los pacientes (Campbell 2015).

Un aspecto de interés es el análisis de las destrezas de los cirujanos durante la ejecución de gestos quirúrgicos dentro de las sesiones de entrenamiento (Tanaka et al. 2015), a fin de estudiar patrones de movimiento que puedan servir como información objetiva del grado de aprendizaje, la detección de posibles gestos riesgosos.

Para ello se implementó un primer prototipo de simulación consistente en un modelo de gráficos de 3D del cráneo, el cerebro y vascularidades a partir de un estudio de CT, integrados en un esquema de interacción mediante un par de interfaces hápticas comerciales (Premium 1.0, Sensable) que emulan el instrumental quirúrgico. Por el momento, el sistema no permite simular el comportamiento dinámico de las estructuras anatómicas de interés, pero permite detectar las colisiones ocurridas entre las estructuras anatómicas en las zonas de interés y el instrumental quirúrgico virtual proveer de retroalimentación visual-táctil positiva o negativa al cirujano.

Se realizó un estudio experimental para la determinación del tamaño mínimo de la apertura en reparación de aneurismas (MOA, por sus siglas en inglés), en sesiones simuladas con el sistema. Se evaluaron experimentalmente diferentes escenarios para diferentes MOA, siendo el MOA de mayor dimensión el correspondiente a menor restricción espacial y mayor posibilidad de



VII

CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍA APLICADA A CIENCIAS DE LA SALUD

16-18
junio 2016

Unidad de Seminarios, BUAP

"GENERACION DE NUEVAS TECNICAS DE DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO"



exploración háptica (menor dificultad), mientras que el MOA más pequeño el de mayor restricción espacial y menor interacción háptica (mayor dificultad).

La retroalimentación se genera cuando el practicante entra en contacto con zonas de interés (las vascularidades del aneurisma), el sistema proporciona retroalimentación positiva tanto visual (en forma de coloración verde de la escena) como háptica (mediante la sensación táctil estable). Por otro lado, cuando el practicante entra en contacto con zonas de riesgo (el MOA, el cráneo, materia gris, el domo del aneurisma), el sistema proporciona retroalimentación negativa: visual (en forma de coloración roja de la escena) y háptica (mediante sensaciones vibrotáctiles).

Dos cirujanos expertos y tres novatos participaron en el estudio. Los resultados preliminares sugieren que el sistema puede ser útil para determinar la apertura mínima que permita mediante la retroalimentación visuotáctil: 1) minimizar el número de contactos en la zonas de riesgo, gracias interacción háptica con el MOA; 2) estabilizar la interacción del practicante cuando interacciona con zonas de interés. Adicionalmente los resultados de este experimento permiten observar diferentes patrones de interacción entre los participantes expertos y los novatos (longitud de las trayectorias de los movimientos, la dispersión espacial, coordinación bimanual).

A pesar de ser aún es limitado, el sistema puede ser útil para estudiar patrones de interacción entre neurocirujanos expertos y novatos y tiene potencial como herramienta de entrenamiento y de evaluación de destrezas médicas.

2. SISTEMA DE SIMULACIÓN

La cirugía de reparación de aneurismas saculares en el cerebro es uno de los procedimientos quirúrgicos más complicados y delicados que puede realizar un neurocirujano (Pouratian et al. 2006). La cirugía se puede realizar comúnmente mediante dos métodos, los cuales son, craneotomía abierta y reparación endovascular (Johnston et al. 2000). En el caso de la craneotomía abierta, una de las características más importantes de la cirugía es la perforación del cráneo, a fin de obtener una ruta de acceso que permita el uso de herramientas especializadas dentro del cráneo del paciente, con lo que es posible realizar la reparación del aneurisma. En este procedimiento el cirujano maniobra a fin de alcanzar el aneurisma y repararlo mediante el uso de una grapa. La minimización del tamaño de la apertura tiene beneficios para la el proceso de recuperación del paciente, sin embargo, esta reducción en el área de trabajo agrega dificultad a la labor del cirujano, por lo que se propone una área de apertura mínima (*minimal opening área* o MOA) la cual debe proporcionar un área de trabajo lo suficientemente amplia para poder realizar la tarea de manera satisfactoria.

En la Figura 1 se muestra el sistema de simulación, este recrea por medio de un ambiente virtual el procedimiento mediante el cual el cirujano maniobra empleando dos dispositivos hápticos (Phantom Premium 1.0), con los que manipula las herramientas virtuales para alcanzar el aneurisma dentro del cráneo. El cráneo cuenta con una apertura la cual permite un acceso completo a las estructuras vasculares donde se ubica el aneurisma. Los modelos con los que se trabaja son modelos rígidos lo cuales han sido deformados para que el usuario solo se enfoque en el procedimiento de despeje del área y clipaje del aneurisma. La simulación física fue implementada empleando la biblioteca de simulación Bullet ("Bullet Physics Library" 2015).

El sistema de simulación provee interacción háptica por medio de la interacción de las herramientas con los modelos del ambiente virtual. Al momento que las herramientas virtuales colisionan con los modelos virtuales se aplica una fuerza mediante el dispositivo háptico que se opone al movimiento de la herramienta mientras esta continúe colisionando con el modelo. La fuerza aplicada es calculada mediante la ley de Hooke que se muestra en la ecuación 1, donde \vec{F} es el vector de fuerza, k es el coeficiente de elongación y \vec{X} es el vector de elongación. Debido a



las limitaciones del dispositivo háptico, solo es posible aplicar fuerzas lineales sobre el centro de masa de las herramientas, no hay modo de aplicar torque con este sistema.

$$\vec{F} = -k\vec{X}, \quad (1)$$



Figura 1. Sistema de simulación de reparación de aneurismas.

El sistema de simulación tiene definidas zonas de interacción positiva y zonas de interacción negativa, dichas zonas fueron definidas por cirujanos expertos. Con base en estas zonas se proporciona una pista visual al usuario en forma de iluminación verde o roja, las cuales indican una zona positiva o negativa respectivamente. A la par de esta pista visual, se cuenta con una pista táctil mediante una modificación a la retroalimentación háptica, está modificación es producida por un factor de escala, el cual produce una sensación diferente (vibración) al hacer contacto con dichas zonas.

El sistema toma muestras de la posición de la punta de cada una de las herramientas con una frecuencia de 20 Hz considerando que se tienen 60 cuadros por segundo en todo momento en el ciclo de graficación del simulador. El censado de las colisiones se realiza por evento, en caso de producirse una colisión se registra que herramienta colisiono y en qué punto, mientras la herramienta no deje de estar en colisión con ese objeto no se registran nuevos puntos de colisión, sin embargo si la herramienta entra en colisión con más de un objeto se registra cada una de las colisiones.

Cuando las herramientas se encuentran dentro del volumen acotado por el cráneo, se realiza un monitoreo de la posición en las que las herramientas interactúan con la porción removida de cráneo, esta toma de muestra se realiza con la misma frecuencia que la lectura de la posición de la punta de la herramienta, estas muestras las denominamos punto de penetración $p_p(x, y, z)$.

3. CALCULO DE MOA

A fin de calcular la MOA es necesario realizar un intento de reparación de aneurisma con la apertura inicial del modelo del cráneo, con lo que se obtendrán los puntos de penetración p_p .

El cálculo de la MOA depende únicamente de los puntos de penetración p_p , a partir de estos puntos se calcula una media $\mu(x, z)$ y una desviación estándar $\sigma(x, z)$ del conjunto de puntos obtenidos. La forma de la MOA propuesta es una apertura circular con centro en la media y un radio r obtenido mediante la suma ponderada por un factor k_{moa} de las varianzas, como se muestra en la ecuación 2.

$$r = k_{moa}\sigma_x^2 + k_{moa}\sigma_z^2, \quad (2)$$



Se propone este radio debido a que se parte del supuesto que el muestreo tiene las características de una distribución Gaussiana como se muestra en la ecuación 3, de este modo podemos fijar un umbral con el que buscamos minimizar el MOA a pesar de que existan penetraciones dispersas.

$$f(x, z) = \frac{1}{r\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{2r^2} + \frac{(z-\mu_z)^2}{2r^2}\right)}, \quad (3)$$

El área circular se proyecta sobre la superficie del cráneo a fin de generar una apertura circular sobre este último; esto limita el movimiento del usuario debido a la interacción háptica con las herramientas, por lo que se introduce más dificultad a la labor del cirujano. En la Figura 2 se muestra una comparativa de la apertura inicial contra tres MOA propuestas mediante la variación del valor del factor $k_{moa} = 2$, $k_{moa} = 1.5$ y $k_{moa} = 1$.

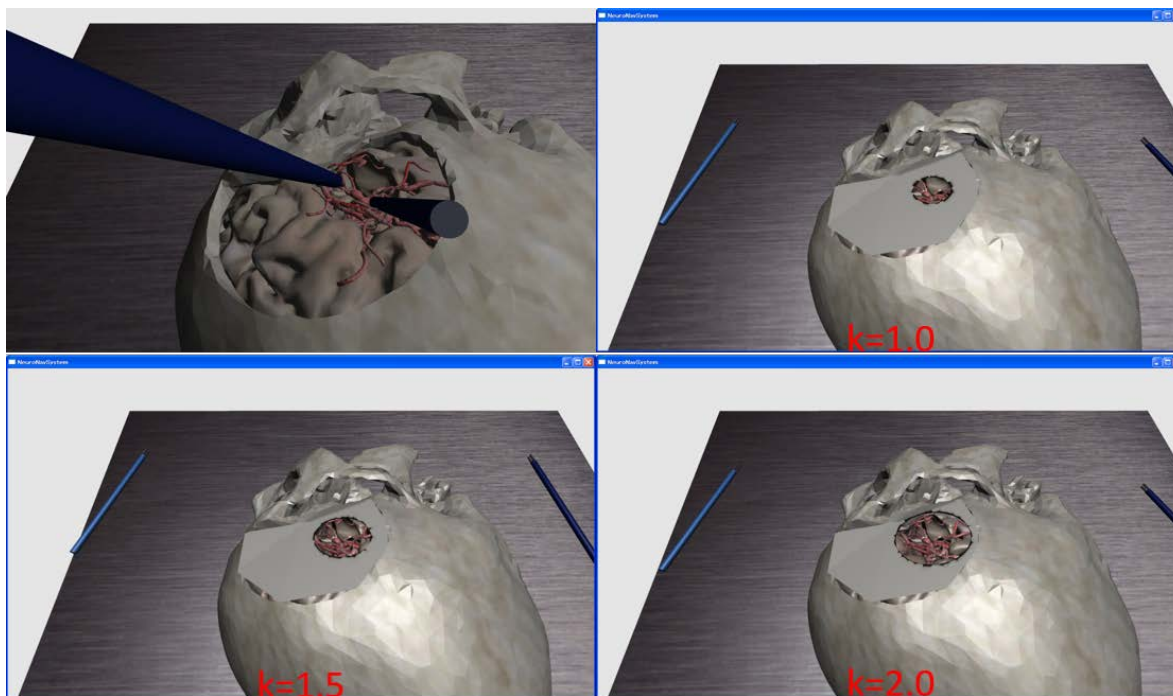


Figura 2. Comparación de MOA propuesta con factores de escala diferentes contra apertura inicial.

4. EXPERIMENTOS

Se diseñó un experimento cuya finalidad era medir las habilidades de los cirujanos mediante la manipulación de las herramientas a fin de hacer contacto con 7 puntos de control, los cuales se encuentran contenidos en las arterias que rodean al aneurisma y el cuello del aneurisma, adicional a esto hay aun zona de riesgo dentro del domo del aneurisma. En la Figura 3 se muestran estos puntos de control con las letras A, B, C, D, E, F para las arterias y G para el cuello del aneurisma.

Para los primeros 6 de los puntos de control no se tiene un orden en el que deben ser ejecutados para ser considerados como exitosos, sin embargo es necesario que estos puntos sean tocados en su totalidad antes de tocar el cuello del aneurisma. Si durante la realización de la tarea el cirujano



llega a tocar el domo del aneurisma se considera como un error y aunque no se descarta la tarea, si se considera como un error grave.

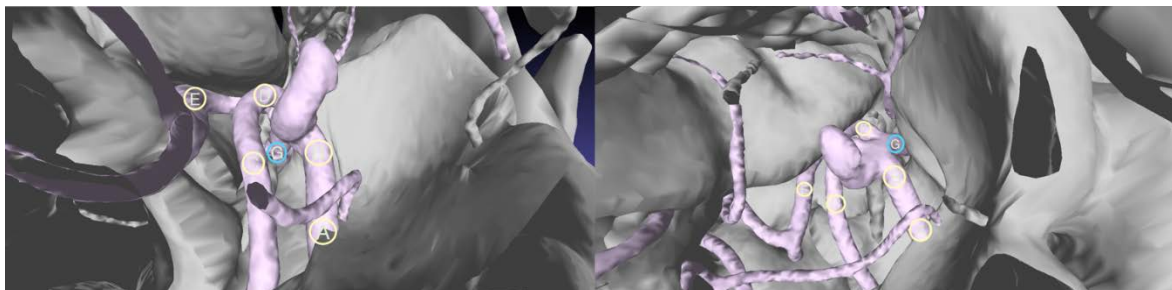


Figura 3. Puntos de control que debe tocar el cirujano con la herramienta para completar la tarea propuesta.

Durante la realización de la tarea se registran eventos como colisiones con las diferentes estructuras anatómicas además de las arterias y aneurisma, la longitud del desplazamiento de la punta, muestreo de penetración e al herramienta con la superficie faltante de cráneo, tiempo para finalización de tarea.

El experimento consta de 4 fases, una fase inicial donde se realiza la tarea asignada con una apertura máxima en el cráneo, a partir de la cual se construye la MOA. Los 3 fases siguientes se realizan colocando el MOA sobre el cráneo, las MOA usadas son MOA-A con $k_{moa} = 2$, MOA-B con $k_{moa} = 1.5$ y MOA-C con $k_{moa} = 1$.

Inicialmente se permitió a los participantes tener unos minutos de prueba con el sistema, previo al experimento, a fin de que se familiarizaran con la interface háptica y la manipulación de cámara en la simulación; el tiempo que se el permitió usar al herramienta fue de 1 minuto. Durante la realización del experimento los participantes fueron asistidos en el control de la cámara. Una vez realizada la primera parte del experimento se procedió inmediatamente a repetir la tarea con los MOA calculados en el siguiente orden MOA-A, MOA-B y MOA-C.

Tabla 1. Resultados experimentos sin MOA.

Sujeto	Numero de impactos										Distancia recorrida [mm]		Radio MOA [mm]			Tiempo [s]	Nivel
	Cerebro		Cráneo		Cuello de aneurisma		Domo de aneurisma		Arterias								
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	A	B	C		
S1	31	17	20	8	8	2	3	6	51	56	5093.03	3603.15	24.78	18.58	12.39	198.64	E
S2	27	20	9	17	3	3	2	2	18	9	5370.02	3685.78	20.99	15.74	10.49	274.73	C
S3	5	12	11	0	3	0	0	0	25	18	731.93	609.08	17.45	13.08	8.72	114.71	0
S4	11	14	0	0	5	6	0	3	23	19	1173.97	1020.08	12.77	9.57	6.38	154.68	0
S5	5	7	1	0	1	0	0	0	12	8	544.39	394.45	18.03	13.52	9.01	88.57	E

En la Tabla 1, 2, 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos para los experimentos sin MOA, MOA-A, MOA-B y MOA-C respectivamente. El nivel del usuario es 0 para el caso de estudiantes sin experiencia, C para los cirujanos graduados y E para los expertos. La nomenclatura R y L se refiere a la herramienta derecha e izquierda respectivamente.



VII CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍA APLICADA A CIENCIAS DE LA SALUD

16-18 junio 2016
Unidad de Seminarios, BUAP

"GENERACION DE NUEVAS TECNICAS DE DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO"



Tabla 2. Resultados de experimentos con MOA-A.

Sujeto	Numero de impactos										Distancia recorrida [mm]		Impactos MOA-A		Tiempo [s]
	Cerebro		Cráneo		Cuello de aneurisma		Domo de aneurisma		Arterias						
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	
S1	17	17	10	16	4	0	3	0	31	5	3054.07	2010.34	3	14	126.57
S2	24	24	11	4	4	4	0	2	26	21	2736.83	1624.55	8	15	149.35
S3	5	10	2	0	2	3	0	1	11	16	830.41	756.32	0	2	128.20
S4	5	4	0	0	5	2	0	2	15	8	1131.69	772.46	5	3	92.78
S5	1	4	10	1	1	0	0	0	19	0	534.54	471.18	3	4	65.23

Tabla 3. Resultados de experimentos con MOA-B.

Sujeto	Numero de impactos										Distancia recorrida [mm]		Impactos MOA-B		Tiempo [s]
	Cerebro		Cráneo		Cuello de aneurisma		Domo de aneurisma		Arterias						
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	
S1	9	11	10	4	3	0	2	0	17	2	1555.50	1150.14	5	2	74.50
S2	21	8	3	1	1	1	0	1	23	12	2549.46	1443.41	7	6	173.75
S3	1	8	0	0	2	1	0	1	22	10	590.87	493.07	8	5	91.36
S4	13	4	0	0	6	0	0	1	14	8	1415.20	1139.66	7	2	95.30
S5	4	6	5	2	2	0	0	0	18	0	754.31	490.86	7	1	79.84

Tabla 4. Resultados de experimentos con MOA-C.

Sujeto	Numero de impactos										Distancia recorrida [mm]		Impactos MOA-C		Tiempo [s]
	Cerebro		Cráneo		Cuello de aneurisma		Domo de aneurisma		Arterias						
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	
S1	5	5	3	1	1	3	1	0	17	8	789.67	876.25	4	3	54.02
S2	11	0	9	0	9	0	1	0	32	0	1465.14	960.97	26	0	113.81
S3	1	7	4	0	3	3	0	1	28	9	572.24	514.60	1	7	109.08
S4	2	19	0	0	0	6	0	2	0	30	1155.30	1045.99	5	18	133.45
S5	1	4	10	1	1	0	0	0	19	0	534.54	471.18	3	4	65.23

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una tendencia de los cirujanos a mejorar y ser más precisos conforme realizan más veces la tarea presentada, por lo que la reducción de la MOA no es un factor que agregue mucha dificultad al procedimiento, debido principalmente a la destreza de los cirujanos expertos. Sin embargo, en el caso de los cirujanos no expertos observamos que existe gran variaciones en su desempeño.

Debido a las libertades que presenta la ejecución de la tarea propuesta, se observó que muchos de los cirujanos realizan el procedimiento de manera aleatoria haciendo gestos que no son requeridos, por lo que requieren de más tiempo para completar la tarea. Dado que el sistema no



VII CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍA APLICADA A CIENCIAS DE LA SALUD

16-18 junio 2016
Unidad de Seminarios, BUAP

"GENERACION DE NUEVAS TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO"



brinda una pista de profundidad a la que están acostumbrados los cirujanos, expresaron tener problema con la ubicación de la herramienta en el espacio de trabajo, por lo que sugirieron se implemente un sistema de visión en 3D.

A fin de mejorar el análisis de habilidades es necesario incrementar la cantidad de puntos de control, rediseñando la tarea que se debe realizar, pero ara ello se requiere de la asistencia de varios expertos a fin de definir una tarea concreta y los puntos de control necesarios para que aunque el usuario realice gestos propios de su técnica, se evalúen solo los gestos más representativos.

Este primer sistema de simulación tiene mucho potencial, sin embargo requiere trabajo no solo en la evaluación de destrezas sino en la parte de simulación, así como dispositivos hápticos con capacidad para aplicar fuerzas mediante torque.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alaraj, Ali, Michael G Lemole, Joshua H Finkle, Rachel Yudkowsky, Adam Wallace, Cristian Luciano, P Pat Banerjee, Silvio H Rizzi, and Fady T Charbel. 2011. "Virtual Reality Training in Neurosurgery: Review of Current Status and Future Applications." *Surgical Neurology International* 2: 52. doi:10.4103/2152-7806.80117.
2. "Brain Aneurysm Repair." 2016. <https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/ency/article/007372.htm>.
3. "Bullet Physics Library." 2015. <http://bulletphysics.org/wordpress/>.
4. Campbell, S. 2015. "Fidelity and Validity in Medical Simulation: Effectively Engaging New Technology Raises the Training Bar." *IEEE Pulse* 6 (4): 4–9. doi:10.1109/MPUL.2015.2428296.
5. Echegaray, G., I. Herrera, I. Aguinaga, C. Buchart, and D. Borro. 2014. "A Brain Surgery Simulator." *IEEE Computer Graphics and Applications* 34 (3): 12–18. doi:10.1109/MCG.2014.43.
6. Johnston, S. C., C. B. Wilson, V. V. Halbach, R. T. Higashida, C. F. Dowd, M. W. McDermott, C. B. Applebury, T. L. Farley, and D. R. Gress. 2000. "Endovascular and Surgical Treatment of Unruptured Cerebral Aneurysms: Comparison of Risks." *Annals of Neurology* 48 (1): 11–19.
7. Pouratian, N, R J Oskouian, M E Jensen, N F Kassell, and A S Dumont. 2006. "Endovascular Management of Unruptured Intracranial Aneurysms." *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry* 77 (5): 572–78. doi:10.1136/jnnp.2005.078469.
8. Tanaka, Shinichi, Kanako Harada, Yoshiki Ida, Kyohei Tomita, Ippei Kato, Fumihito Arai, Takashi Ueta, Yasuo Noda, Naohiko Sugita, and Mamoru Mitsuishi. 2015. "Quantitative Assessment of Manual and Robotic Microcannulation for Eye Surgery Using New Eye Model." *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 11 (2): 210–17. doi:10.1002/rcs.1586.